Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.Ф. ШЕВЧЕНКО, Л.Г. ШЕВЧЕНКО

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2020

УДК 621.313.333(075.8)
Ш 379

Рецензенты:

В.Ю. Нейман, д-р техн. наук, профессор
Г.А. Шаншуров, канд. техн. наук, доцент

Работа подготовлена на кафедре электромеханики

Шевченко А.Ф.
Ш 379 Проектирование асинхронных двигателей: учебное пособие / А.Ф. Шевченко, Л.Г. Шевченко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2020. – 122 с.

ISBN 978-5-7782-4106-0

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования асинхронных машин на примере расчета машин серии 4А. Представленная методика расчета содержит все основные разделы проектирования от выбора главных размеров до расчета рабочих характеристик. Однако особое внимание уделяется электромагнитному расчету асинхронного двигателя.

Учебное пособие составлено применительно к учебным программам курса «Электрические машины» для студентов факультета мехатроники и автоматизации и может быть полезно студентам, обучающимся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», при выполнении курсовых и квалификационных работ.

УДК 621.313.333(075.8)

ISBN 978-5-7782-4106-0

© Шевченко А.Ф., Шевченко Л.Г., 2020
© Новосибирский государственный технический университет, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии приведены основные стандарты, которым должна соответствовать проектируемая электрическая машина, методика расчета элементов машины, ее параметров и характеристик. Поверочные расчеты вентиляции и элементов конструкции не приведены в учебном пособии и могут быть предложены студентам по указанию преподавателя.

Пояснительная записка выполняется в соответствии с ГОСТ 732-2017 на оформление отчетов и должна содержать необходимый минимум эскизов и поясняющих чертежей. В качестве основных учебных пособий следует пользоваться книгами [1, 2].

Кроме названных книг полезными при проектировании могут служить [3–5].

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЕ

Проектируемая асинхронная машина должна соответствовать последним достижениям в области расчета и конструирования электрических машин переменного тока. С 1973 года асинхронные двигатели от 0,06 до 400 кВт при частотах вращения 500–3000 об/мин выпускаются главным образом в виде серии 4А, которая заменила в этом диапазоне мощностей серию А2, разработанную и освоенную в 60-х годах. Серия 4А удовлетворяет рекомендациям МЭК (Международной электротехнической комиссии) по шкале мощностей и установочным размерам, что обеспечивает взаимозаменяемость с электрическими машинами, изготовленными другими фирмами. Благодаря применению электротехнической стали с улучшенными магнитными свойствами, реализации запасов по нагреву и усовершенствованию охлаждения, а также переходу на более высокие классы изоляции мощность двигателей серии 4А при данных высотах оси вращения на 2–3 ступени шкалы мощностей больше по сравнению с двигателями серии А2. Это позволило уменьшить массу двигателей в среднем на 15–18 % и сэкономить 20–25 % обмоточной меди и электротехнической стали при тех же энергетических показателях.

1.1. Шкала мощностей, установочные и присоединительные размеры

Мощность, установочные и присоединительные размеры, увязка мощности с установочными размерами проектируемого асинхронного двигателя должны соответствовать ГОСТ 12139-84, 13267-73, 18709-73 и 19523-81. Увязка мощностей с установочными размерами асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44 приведена в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Высота оси вращения двигателей

Высота оси вращения, мм	Обозна-чение длины	Мощность двигателя, кВт при $2p$					
		2	4	6	8	10	12
56	–	0,18 0,25	0,12 0,18	– –	– –	– –	– –
63	–	0,37 0,55	0,25 0,37	0,18 0,25	– –	– –	– –
71	–	0,75 1,1	0,55 0,75	0,37 0,55	0,25 –	– –	– –
80	–	1,5 2,2	1,1 1,5	0,75 1,1	0,37 0,55	– –	– –
90	L	3,0 –	2,2 –	1,5 –	0,75 1,1	– –	– –
100	S L	4,0 5,5	3,0 4,0	– 2,2	– 1,5	– –	– –
112	M	7,5 –	5,5 –	3,0 4,0	2,2 3,0	– –	– –
132	S M	– 11	7,5 11	5,5 7,5	4,0 5,5	– –	– –
160	S M	15 18,5	15 18,5	11 15	7,5 11	– –	– –
180	S M	22 30	22 30	– 18,5	– 15	– –	– –
200	M L	37 45	37 45	22 30	18,5 22	– –	– –
220	M	55	55	37	30	–	–
250	S M	75 90	75 90	45 55	37 45	– –	– –
280	S M	110 132	110 132	75 90	55 75	– –	– –
315	S M	160 200	160 200	110 132	90 110	55 75	45 55
355	S M	250 315	250 315	160 200	132 160	90 110	75 90

На одной высоте вращения для каждого числа пар полюсов обычно выполняются двигатели двух мощностей. В этой же таблице приведены условные обозначения длин корпусов (по расстоянию между осями отверстий под крепежные болты в лапах) двигателей с одинаковыми высотами оси вращения: S – малая длина; M – средняя; L – большая.

1.2. Номинальные напряжения

Номинальные напряжения питающих сетей переменного тока до 1000 В устанавливаются ГОСТ 21128-83. Из практики проектирования установлены определенные диапазоны мощностей, для которых наиболее целесообразными и экономически обоснованными являются следующие номинальные напряжения:

Мощность, кВт	0,06...0,37	0,55...11	15...110	132...400
$U_н$, В	220 и 380	220, 380 и 660	220/380 380/660	380/660

1.3. Исполнение двигателя по степени защиты

Исполнение электрических машин по степени защиты установлены ГОСТ 17494-72. Под понятием защиты электрических машин подразумевается защита обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, находящимися внутри машины, и защита машин от попадания внутрь твердых посторонних тел и воды.

Асинхронные двигатели серии 4А по степени защиты выполняются в двух исполнениях: ***IP23*** – защищенное; ***IP44*** – закрытое (***IP*** – *International Protection* – международная защита).

Первая цифра характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями. Вторая цифра характеризует степень защиты от попадания твердых посторонних тел и воды внутрь машины.

1.4. Исполнение по способу охлаждения

Асинхронные двигатели серии 4А по способу охлаждения выполняются трех исполнений: ***IC01*** – защищенная машина с самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины; ***IC0141*** – закрытая машина с естественным охлаждением; ***IC0151*** – закрытая машина, имеющая корпус с трубами для прохода воздуха, с наружным и внутренним вентиляторами (***IC – International Cooling*** – международное охлаждение).

Рекомендуемые способы охлаждения в зависимости от высоты вращения двигателей и исполнения по степени защиты приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Рекомендуемые способы охлаждения

Исполнение по степени защиты	Высота оси вращения	Способ охлаждения
IP23	160...560	IC01
IP44	50...355	IC0141
IP44	400...630	IC0151

Экспериментальные исследования свидетельствуют о предпочтительном применении радиальной системы вентиляции перед аксиальной в двигателях со степенью защиты IP23. Степень защиты IP23 для машин с самовентиляцией предопределяет применение наружного обдува корпуса.

1.5. Исполнения и модификации двигателей серии 4А

Формы исполнения асинхронных двигателей общего назначения по способу монтажа и их условные обозначения установлены ГОСТ 2479-79:

- **М10** – на лапах с двумя подшипниковыми щитами;
- **М20** – на лапах с большим фланцем со стороны выступающего конца вала;
- **М30** – без лап с большим фланцем со стороны выступающего конца вала.

Исполнение двигателей для различных климатических районов, категории, условия эксплуатации, хранения и транспортировки двигателей устанавливаются ГОСТ 15150-69 и ГОСТ 15543-70.

Серия 4А имеет примерно 100 тыс. модификаций. Основные электрические модификации приведены в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Электрические модификации двигателей серии 4А

Тип модификации	Назначение
С повышенным пусковым моментом	Для привода механизмов с большими пусковыми моментами (компрессоры, дробилки и т. д.)
С повышенным скольжением	Для привода механизмов с большими моментами инерции, с нагрузкой пульсирующего характера, с большой частотой пуска и реверсов
С повышенными энергетическими показателями	Для привода механизмов с круглосуточной работой, при которой особое значение имеет повышение КПД
С фазным ротором	Применяется, когда мощность питающей сети недостаточна для пуска двигателей с короткозамкнутым ротором и в регулируемых электроприводах
Многоскоростные	Для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения
Встраиваемые	Для встраивания в станки и механизмы

Кроме перечисленных имеется ряд специализированных исполнений. Размеры всех модификаций (за исключением двигателей с фазным ротором) совпадают с размерами соответствующих двигателей основного исполнения.

1.6. Обозначение типов двигателей

Обозначения двигателей серии 4А расшифровываются следующим образом:

4 – порядковый номер серии;
А – асинхронный;
Н – обозначение двигателей защищенного исполнения;
А – станина и щиты из алюминия;
Х – станина из алюминия и чугунные щиты;
50…355 – высота оси вращения;
S, L, M – установочные размеры по длине корпуса;

А, В – обозначение длины магнитопровода (первая длина – А, вторая – В);

2, 4, 6, 8, 10, 12 – числа полюсов;

У – климатическое исполнение;

3 – категория размещения.

Например: **4АА56А2У3** – двигатель серии 4А, асинхронный закрытого исполнения, станина и подшипниковые щиты из алюминия, высота оси вращения 56 мм, магнитопровод первой длины, двухполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

2. ВЫБОР ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ, РАСЧЕТ И ВЫБОР РАЗМЕРОВ МАГНИТОПРОВОДА

Главными размерами электрической машины является диаметр расточки статора D_1 и длина сердечника статора l_δ. От размеров D_1 и l_δ и соотношения между ними зависят вес машины, ее стоимость и технико-экономические характеристики.

В серии асинхронных машин 4А выбор главных размеров осуществляется исходя из увязки, сделанной между мощностью машины при определенном числе пар полюсов и высотой оси вращения, с одной стороны, и между высотой оси вращения и диаметром D_1 статора и наружным диаметром пакета активной стали D_a, с другой стороны. Эти увязки приняты на основе существующего опыта расчета и эксплуатации асинхронных машин.

Выбор главных размеров рекомендуется производить в следующем порядке.

2.1. Определяется высота оси вращения (табл. 1.1) и наружный диаметр сердечника статора D_a (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Наружный диаметр сердечника статора

h, мм	50	56	63	71	80	90	100	112	132
D_a, м	0,086	0,089	0,1	0,116	0,131	0,149	0,168	0,191	0,225
h, мм	160	180	200	225	250	280	315	355	
D_a, мм	0,272	0,313	0,349	0,392	0,437	0,520	0,590	0,660	

2.2. Внутренний диаметр статора, м:

$$D_1 = k_D \cdot D_a, \tag{2.1}$$

гдс k_D – по табл. 2.2.

Таблица 2.2

Отношение $k_D = D_1/D_a$ в двигателях серии 4А при различных числах полюсов

$2p$	2	4	6	8…12
k_D	0,52...0,57	0,64...0,68	0,70...0,72	0,74...0,77

2.3. Расчетная мощность, Вт:

$$P' = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos\varphi}, \tag{2.2}$$

где η и $\cos\varphi$ определяются из рис. 2.1 и 2.2, k_E – из рис. 2.3.

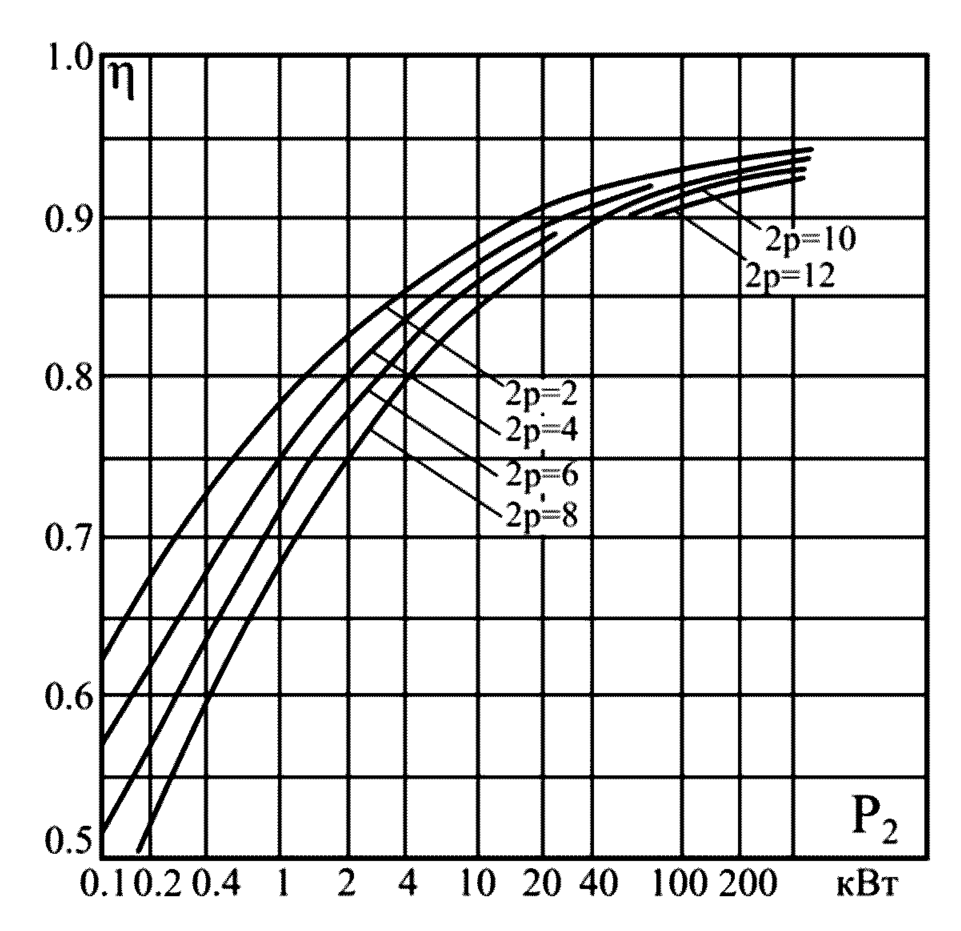


Рис. 2.1. Среднее значение КПД асинхронных двигателей

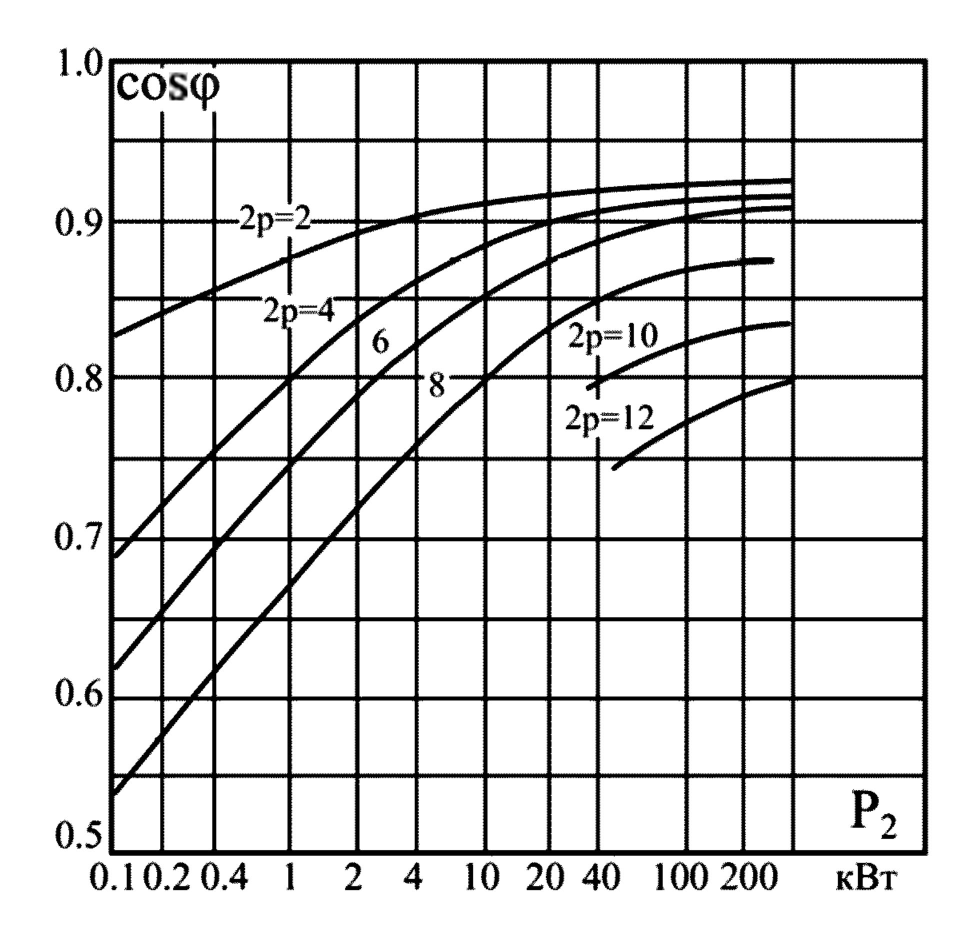


Рис. 2.2. Средние значения коэффициентов мощности асинхронных двигателей

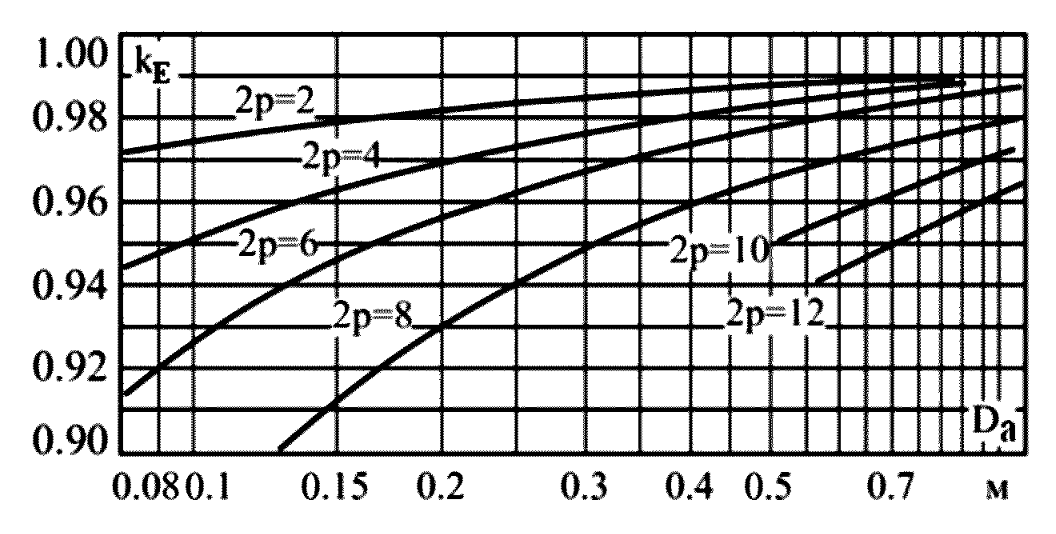


Рис. 2.3. Значения коэффициента k_E

2.4. Полюсное деление, м:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2p}. \qquad (2.3)$$

2.5. Электромагнитные нагрузки A и B_δ – по рис. 2.4 и 2.5.

а *б*

Рис. 2.4. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44:

а – при высоте оси вращения h < 132 мм; *б* – при высоте оси вращения h = 160…250 мм

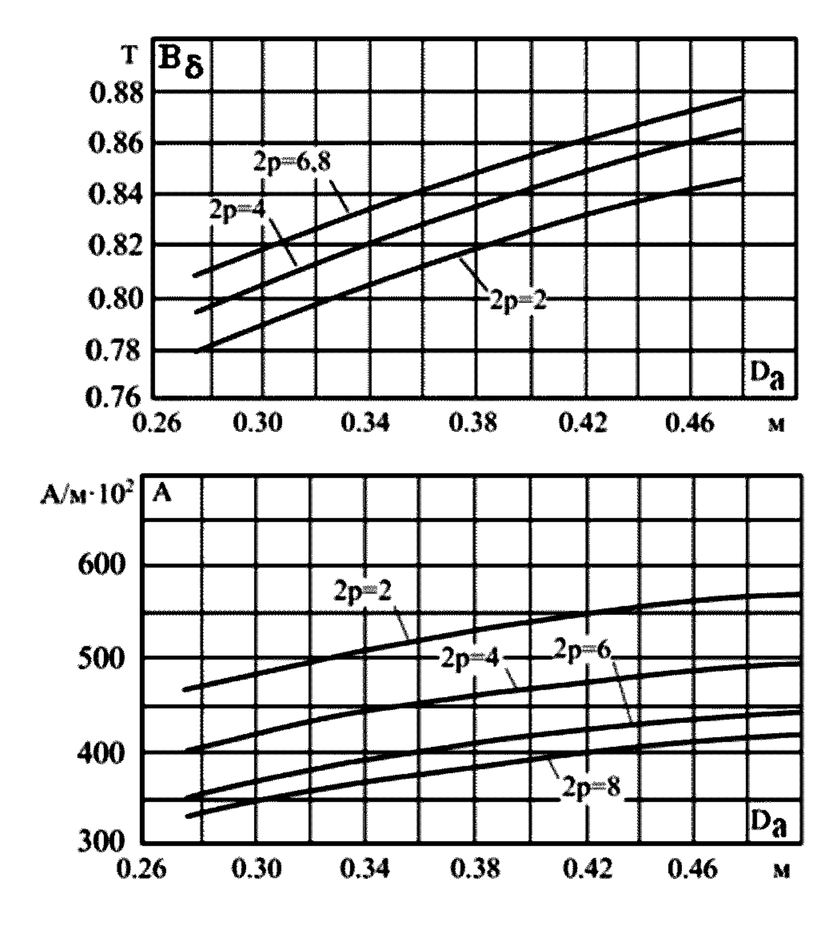


Рис. 2.5. Электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP23

2.6. Расчетная длина воздушного зазора, м:

$$l'_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D_1^2 \cdot \Omega \cdot k_{об1} \cdot A \cdot B_\delta}, \qquad (2.4)$$

где $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n_1 / 60$;

$k_B = 1{,}11$ – коэффициент формы поля;

$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент, предварительно $k_{об1} = 0{,}95$.

2.7. Отношение $\lambda = l'_\delta / \tau$ должно находиться в рекомендуемых пределах по рис. 2.6.

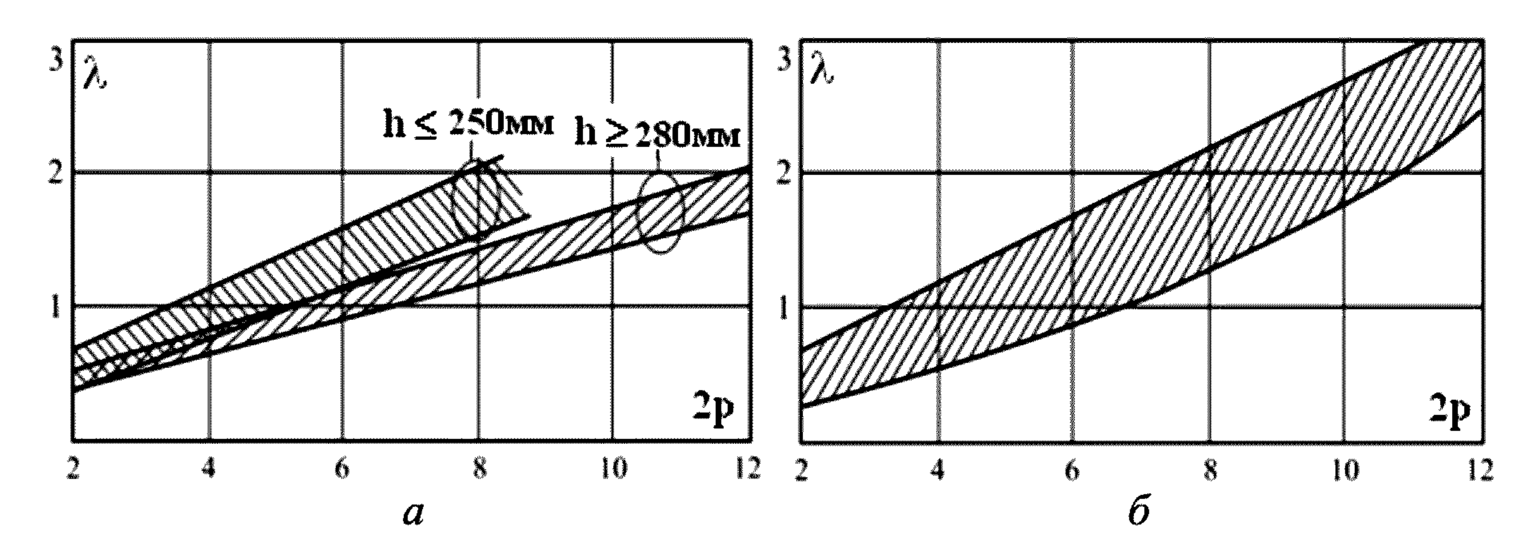


Рис. 2.6. Отношение $\lambda = l'_\delta / \tau$ у двигателей серии 4А:

а – со степенью защиты IP44; *б* – со степенью защиты IP23

2.8. Воздушный зазор между статором и ротором δ.

При малых δ требуется небольшая намагничивающая сила обмотки, понижается реактивная составляющая тока холостого хода, повышается $\cos\varphi$. Однако при этом увеличиваются магнитное рассеяние, добавочные потери.

Обычно величина δ определяется по эмпирическим формулам. Для серии 4А выбор воздушного зазора рекомендуется проводить по установленным практикой электромашиностроения средним значениям δ из рис. 2.7. Выбранные значения δ округляются до 0,05 мм при $\delta \le 0{,}5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0{,}5$ мм.

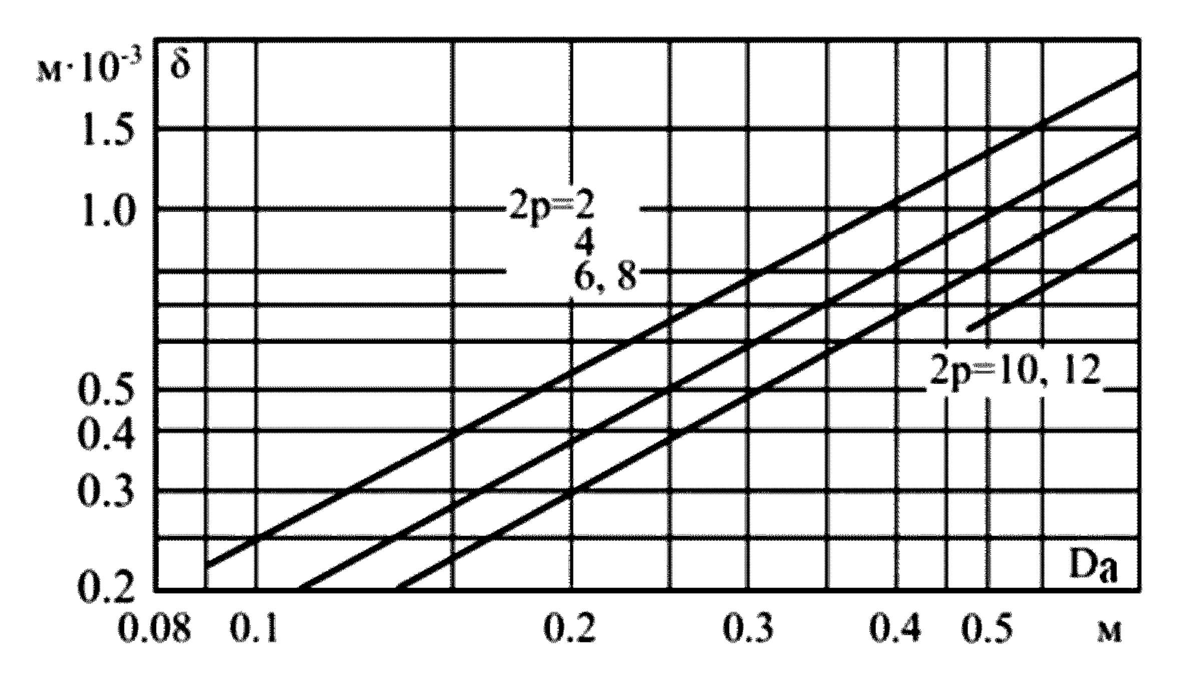


Рис. 2.7. Средние значения $\delta = f(D_a)$

2.9. Наружный диаметр сердечника ротора, м:

$$D_2 = D_1 - 2\delta\ . \tag{2.5}$$

2.10. Внутренний диаметр листов ротора, м:

$$D_{2B} = k_b \cdot D_2\ , \tag{2.6}$$

где k_b берутся из табл. 2.3.

Таблица 2.3

Значения коэффициента k_b

h, мм	50...63	71...250	280...355	
$2p$	2...6	2...8	2	4...12
k_b	0,19	0,23	0,22	0,23

2.11. Число и размеры аксиальных каналов (в мм) могут быть определены по табл. 2.4. Аксиальные каналы располагаются в один ряд. При высоте оси вращения $h < 250$ мм аксиальные каналы не выполняются.

Таблица 2.4

Определение $n_{k2} \times d_{k2}$

h, мм		250	280	315	355
$n_{k2} \times d_{k2}$	$2p = 2$	10 × 15	12 × 20	12 × 20	12 × 20
	$2p = 4$	10 × 20	12 × 23	12 × 40	12 × 50
	$2p = 6$	10 × 30	12 × 32	12 × 40	12 × 50

3. ОБМОТКА СТАТОРА

3.1. Тип и число витков обмотки

Обмотки, нашедшие наибольшее применение в асинхронных машинах серии 4А, в зависимости от номинального напряжения и высоты оси вращения приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Тип обмотки и формы пазов статора

U, В	h, мм	$2p$	Тип обмотки	Пазы (формы)
≤ 380	50...63	2, 4, 6	Однослойная, всыпная, концентрическая	Трапецеидальные полузакрытые
≤ 660	71...160	2, 4, 6, 8	Однослойная, всыпная, концентрическая	Трапецеидальные полузакрытые
≤ 660	180...250	2, 4, 6, 8	Двухслойная всыпная	Трапецеидальные полузакрытые
≤ 660	280...355	2, 4, 6, 8	Двухслойная из жестких полукатушек	Прямоугольные полуоткрытые
≤ 660	280...315	10, 12	Двухслойная, всыпная, концентрическая	Трапецеидальные концентрические
≤ 660	355	10, 12	Двухслойная из жестких полукатушек	Прямоугольные открытые

3.1.1. Числа пазов статора и ротора зависят от чисел полюсов и диаметра сердечника. От сочетания чисел пазов статора и короткозамкнутого ротора зависят добавочные потери, величина провалов в характеристике пускового момента, уровень шума и вибрации двигателя. Практикой установлены наиболее благоприятные сочетания чисел Z_1/Z_2, которые приведены в табл. 3.2.

3.1.2. Число пазов на полюс и фазу статора:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2mp}. \tag{3.1}$$

Значение q_1 выбирают, как правило, целым, не превышающим 10. Исключение составляют двигатели с высотой оси вращения h = = 71…100 мм при $2p$ = 8. Для этих двигателей принимают q_1 = 1,5. Также для двигателей с h = 280…355 при $2p$ = 12 принимается q_1 = 2,5.

Таблица 3.2

Рекомендуемые числа пазов статора и ротора

h, мм	Z_1/Z_2 при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50...63	24/19	24/18	36/28	–	–	–
71	24/19	24/18	36/28	36/28	–	–
80...100	24/19	36/28	36/28	36/28	–	–
112...132	24/19	36/34	54/51	48/44	–	–
160	36/28	48/38	54/51	48/44	–	–
180...200	36/28	48/38	72/58	72/58	–	–
225	36/28	48/38	72/56	72/56	–	–
250	48/40	60/50	72/56	72/56	–	–
280...355	48/38	60/70	72/82	72/86	90/106	90/106

3.1.3. Обмоточный коэффициент:

$$k_{об1} = k_{p1} \cdot k_{y1}, \tag{3.2}$$

где k_{p1} – коэффициент распределения обмотки:

$$k_{p1} = \frac{0,5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{q_1}\right)}; \tag{3.3}$$

k_{y1} – коэффициент укорочения обмотки:

$$k_{y1} = \sin(\beta \cdot 90^\circ). \tag{3.4}$$

Однослойная обмотка с целым q_1 выполняется без укорочения с диаметральным шагом по пазам ($\beta = 1$).

Двухслойная обмотка обычно выполняется петлевой с укороченным шагом по пазам:

$$y_{п1} = \beta \frac{Z_1}{2p}. \tag{3.5}$$

Укорочение шага β близко или равно 0,83 при $2p \geq 4$ и 0,58…0,63 при $2p = 2$.

3.1.4. Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре, Вб:

$$\Phi_{предв} = B_\delta \cdot D_1 \cdot l'_\delta \cdot \frac{1}{p}. \tag{3.6}$$

Средние значения магнитной индукции B_δ в зависимости от наружного диаметра сердечника и числа полюсов приведены на рис. 2.4 и 2.5.

3.1.5. Предварительное число витков в обмотке фазы:

$$W_{1предв} = \frac{k_E \cdot U_1}{4,44 \cdot k_{об1} \cdot f_1 \cdot \Phi_{предв}}, \tag{3.7}$$

где k_E – определяется по рис. 2.3.

3.1.6. Предварительное число эффективных проводников в пазу:

$$u_{\text{предв}} = W_{1\text{предв}} \cdot \frac{a_1}{p \cdot q_1}, \qquad (3.8)$$

где a_1 – число параллельных ветвей фазы обмотки статора (предварительно a_1 выбрать равным 1).

Число эффективных проводников $u_{\text{п}}$ округляют до ближайшего целого числа. У двухслойных обмоток $u_{\text{п}}$ должно быть четным числом.

Обмотку разделяют на параллельные ветви при больших значениях фазного тока, для которого требуется большая площадь поперечного сечения проводника. Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое число витков.

3.1.7. Уточненное число витков обмотки фазы статора:

$$W_1 = u_{\text{п}} \cdot p \cdot q_1 / a_1, \qquad (3.9)$$

где $u_{\text{п}}$ – принятое целое число эффективных проводников в пазу.

3.1.8. Уточненная расчетная длина сердечника статора, м:

$$l_\delta = l'_\delta \cdot W_{1\text{предв}} / W_1. \qquad (3.10)$$

Значение l_δ при длине сердечника менее 100 мм округляют до ближайшего целого числа, мм. При большей длине – до 5 или 10 мм.

3.1.9. Уточненное значение магнитного потока, Вб:

$$\Phi = \Phi_{\text{предв}} \cdot W_{1\text{предв}} / W_1. \qquad (3.11)$$

3.1.10. Уточненное значение индукции в воздушном зазоре, Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot \mathrm{p}}{\mathrm{D}_1 \cdot l_\delta}. \qquad (3.12)$$

3.1.11. Номинальный фазный ток, А:

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_1}{3 \cdot U_1 \cdot \cos\varphi}. \qquad (3.13)$$

3.1.12. Линейная нагрузка статора, А/м:

$$A_1 = \frac{u_{\text{п}} \cdot Z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1}. \qquad (3.14)$$

Средний уровень линейных нагрузок двигателей серии 4А приведен на рис. 2.4, 2.5.

3.1.13. Предварительная высота спинки статора, м:

$$h_{c1} = \frac{\Phi}{2 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot B_{c1}}, \qquad (3.15)$$

где k_c – коэффициент заполнения сердечника статора сталью $k_c \approx \approx 0{,}95\ldots0{,}97$;

B_{c1} – магнитная индукция в спинке статора.

Допустимые значения B_{c1} приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Средние значения магнитной индукции в спинке статора

h, мм	50...132			160...250			280...355		
$2p$	2,4	6	8	2,4	6	8	2,4,6	8,10	12
B_{c1}, Тл	1,5... 1,65	1,45... 1,6	1,2... 1,35	1,45... 1,6	1,35... 1,5	1,1... 1,2	1,35... 1,5	1,3... 1,45	1,15... 1,3

3.1.14. Высота паза статора, м:

$$h_{\text{п}1} = \frac{(D_{\text{а}} - D_1)}{2} - h_{c1}. \qquad (3.16)$$

3.1.15. Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора, м:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1}. \qquad (3.17)$$

3.2. Размеры трапецеидальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки

Формы и размеры трапецеидального полузакрытого паза показаны на рис. 3.1, *а*.

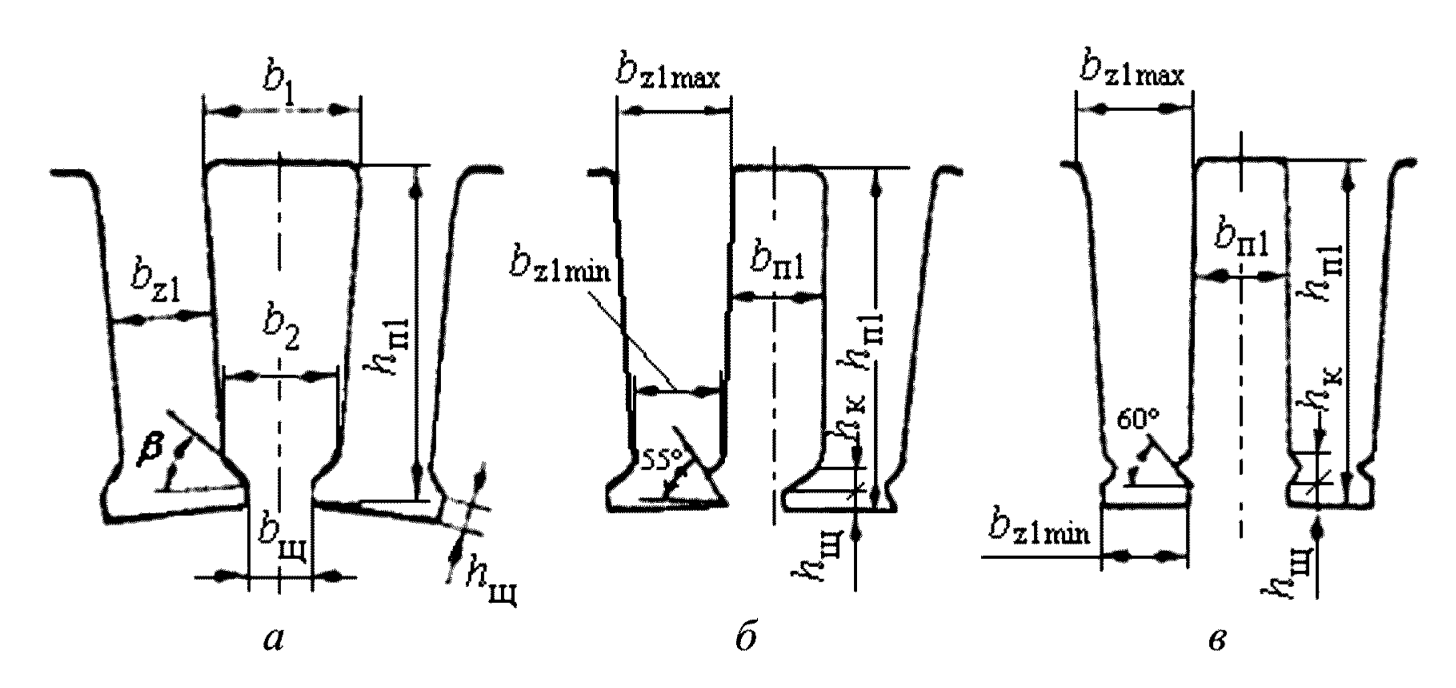


Рис. 3.1. Форма и размеры пазов статора:
а – трапецеидального полузакрытого; *б* – прямоугольного полуоткрытого; *в* – прямоугольного открытого

3.2.1. Расчетная ширина зубца с равновеликим сечением, м:

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{z1}} . \qquad (3.18)$$

Допустимые значения магнитной индукции в зубцах B_{z1} приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Средние значения магнитной индукции в зубцах с параллельными стенками

h, мм	50…132		160...250		280...315
2*p*	2, 4, 6	8	2	4, 6, 8	10, 12
B_{z1}, Тл	1,75…1,95	1,7...1,9	1,75...1,95	1,7...1,85	1,6...1,8

3.2.2. Размеры трапецеидального паза при угле β = 45° (для двигателей с высотами вращения h = 50…250 мм).

Большая ширина паза, м:

$$b_1 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{п1})}{Z_1} - b_{z1}, \tag{3.19}$$

меньшая ширина паза, м:

$$b_2 = \frac{\left[\pi\left(D_1 + 2h_{щ} - b_{щ}\right) - Z_1 b_{z1}\right]}{Z_1 - \pi}, \tag{3.20}$$

где $b_{щ}$ – ширина шлица принимается из табл. 3.5,

$h_{щ}$ – высота шлица: для двигателей с высотами вращения 50…132 мм принимается $h_{щ} = 0,5 \cdot 10^{-3}$, а с высотами оси вращения 160…315 мм $h_{щ} = 1,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь поперечного сечения паза, м^2:

$$Q'_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2}\left(h_{п1} - h_{щ} - \frac{b_2 - b_{щ}}{2}\right). \tag{3.21}$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, м^2:

$$Q''_{п1} = Q'_{п1} - Q_{и} - Q_{пр}, \tag{3.22}$$

где $Q_{пр}$ – площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином;

$Q_{пр} \approx (0,4b_1 + 0,9b_2) \cdot 10^{-3}$ при h = 180…250 мм и

$Q_{пр} \approx 0,6 \cdot (b_1 + b_2) \cdot 10^{-3}$ при h = 280…315 мм.

$Q_{и}$ – площадь поперечного сечения корпусной изоляции, м^2:

$$Q_{и} = b_{и}(2h_{п1} + b_1 + b_2), \tag{3.23}$$

где $b_{и}$ – односторонняя толщина корпусной изоляции, м:

$b_{и} = 0,2 \cdot 10^{-3}$ при h = 50…80 мм,

$b_и = 0{,}25 \cdot 10^{-3}$ при h = 90…132 мм,

$b_и = 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ при h = 180…250 мм,

$b_и = 0{,}55 \cdot 10^{-3}$ при h = 280…315 мм.

Таблица 3.5

Средние значения ширины шлица полузакрытого паза статора

h, мм	$b_щ \cdot 10^{-3}$, м при $2p$					
	2	4	6	8	10	12
50...63	2,8	2,8	1,8	1,8	–	–
71	2,0	2,0	2,0	2,0	–	–
80, 90	3,0	3,0	2,7	2,7	–	–
100, 112	3,5	3,5	3,0	3,0	–	–
132	4,0	3,5	3,5	3,5	–	–
160...250	4,0	3,7	3,7	3,7	–	–
280...315	–	–	–	–	4,0	4,0

3.2.3. Размеры трапецеидального паза, мм, при угле β = 30° (для двигателей с высотами вращения h = 280…385 мм, $2p$ = 10, 12).

Большая ширина паза – b_1 (п. 3.2.2),

Меньшая ширина паза, м:

$$b_2 = \frac{\left[\pi\left(D_1 + 2h_щ - \frac{b_щ}{\sqrt{3}} - Z_1 b_{z1}\right)\right]}{z_1 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}}. \qquad (3.24)$$

Площадь поперечного сечения паза, м^2:

$$Q'_п = \frac{b_1 + b_2}{2}\left(h_{c1} - h_щ - \frac{b_2 - b_щ}{2\sqrt{3}}\right). \qquad (3.25)$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой (п. 3.2.2).

3.2.4. Размеры проводников.

Для обмоток статоров с полузакрытыми пазами рекомендуется применение следующих марок проводов круглого поперечного сечения: ПЭТВ или ПЭТВМ при классе нагревостойкости B и ПЭТ-155 или ПЭТМ при классе нагревостойкости F.

Допустимый диаметр изолированного проводника, м:

$$d' = \sqrt{\frac{k_{п} Q''_{п1}}{u_{п}}}\,, \tag{3.26}$$

где $k_{п}$ – коэффициент заполнения, $k_{п} = 0,7\ldots0,75$.

Диаметр d' не должен превышать 1,71 мм. При больших значениях d' эффективные проводники подразделяют на элементарные. Число элементарных проводников обычно не превышает 5–6.

Далее подбирается ближайший стандартный диаметр голого проводника d и изолированного d' по табл. П-1 (прил. 1). После этого уточняется коэффициент заполнения паза:

$$k_{п} = \frac{n_{эл} u_{п} (d')^2}{Q''_{п1}}\,, \tag{3.27}$$

где $n_{эл}$ – число элементарных проводников в эффективном проводнике.

Если $k_{п}$ окажется больше допустимого, то соответственно уменьшают диаметр провода или же увеличивают размеры паза.

3.2.5. Плотность тока в обмотке статора, А/м^2:

$$J_1 = \frac{I_1}{n_{эл} q_{эл} a_1}\,, \tag{3.28}$$

где $q_{эл}$ – площадь элементарного проводника.

3.2.6. Тепловая нагрузка обмотки статора $A_1 J_1$, А^2/м^3.

Тепловая нагрузка пропорциональна плотности теплового потока. Значения тепловой нагрузки не должны превышать средние допустимые, приведенные на рис. 3.2, 3.3.

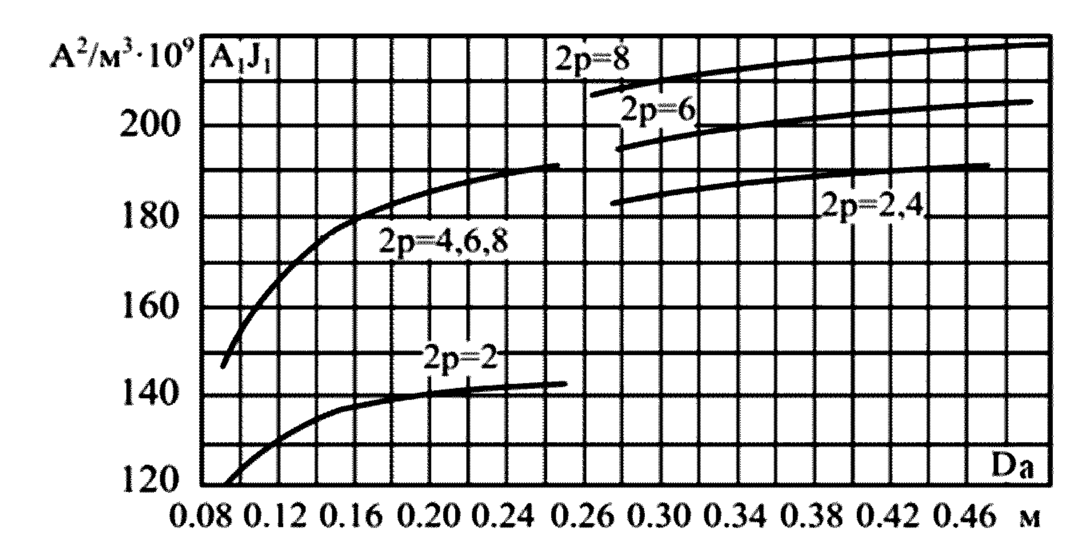


Рис. 3.2. Средние значения $A_1J_1 = f(D_a)$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP44

Если полученное из расчета значение A_1J_1 превышает допустимое более чем на 10 %, то следует выбрать проводник большего сечения. Для размещения проводника в пазу следует увеличить размеры паза с условием, чтобы индукции B_{c1} и B_{z1} не превосходили допустимые значения.

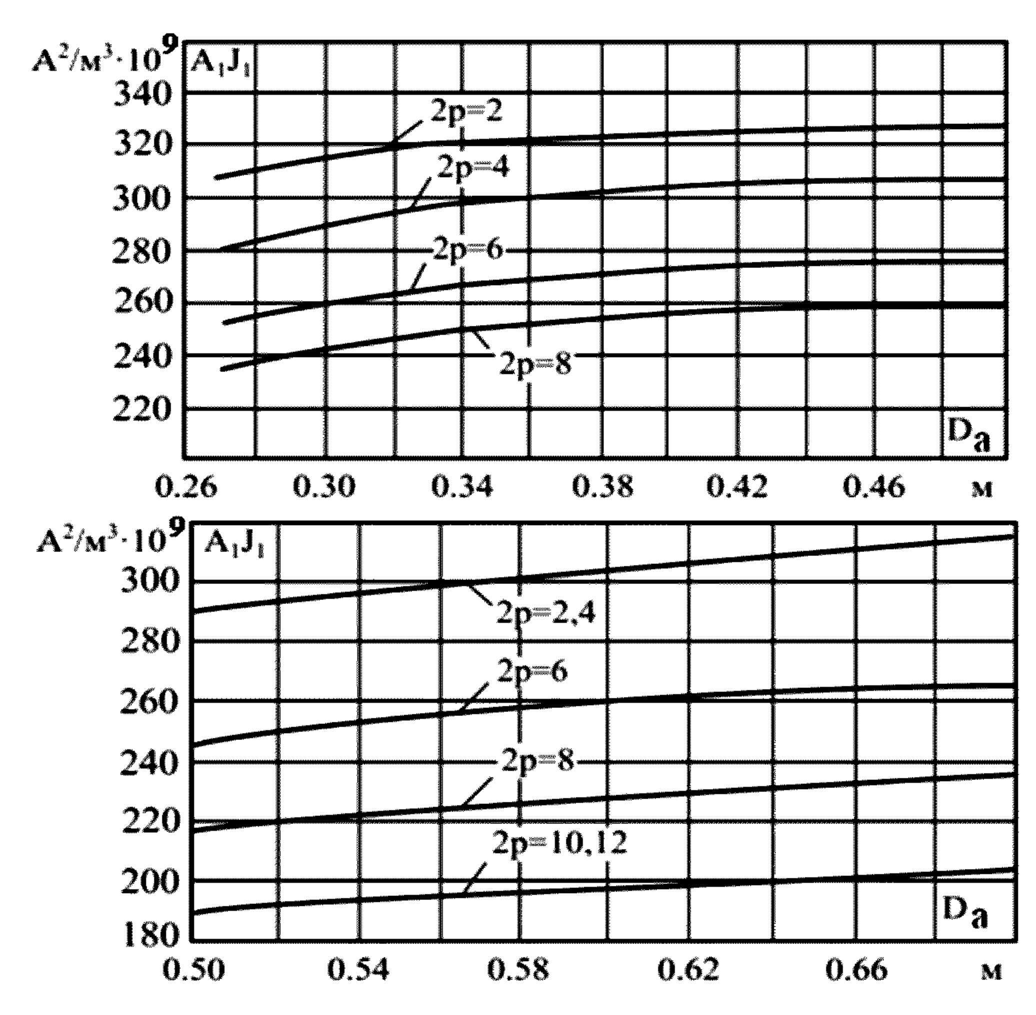


Рис. 3.3. Средние значения $A_1J_1 = f(D_a)$ асинхронных двигателей серии 4А со степенью защиты IP23

3.2.7. Размеры обмотки.

Средняя ширина катушки обмотки статора, м:

$$b_{ср} = t_{ср} y_{п1}, \qquad (3.29)$$

где $y_{п1}$ – шаг по пазам обмотки статора;

$t_{ср}$ – среднее зубцовое деление статора, м:

$$t_{ср} = \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{Z_1}. \qquad (3.30)$$

Средняя длина одной лобовой части катушки, м:

$$l_{л1} = (1{,}16 + 0{,}14p) \cdot b_{ср} + 0{,}015. \qquad (3.31)$$

Средняя длина витка обмотки, м:

$$l_{ср1} = 2(l_\delta + l_{л1}). \qquad (3.32)$$

Длина вылета лобовой части обмотки, м:

при $h \le 132$ мм

$$l_{в1} = (0{,}19 + 0{,}1p) \cdot b_{ср} + 0{,}01, \qquad (3.33)$$

при $h \ge 160$ мм

$$l_{в1} = (0{,}12 + 0{,}15p) \cdot b_{ср} + 0{,}01. \qquad (3.34)$$

3.3. Размеры полуоткрытых и открытых прямоугольных пазов и проводников

Форма и размеры прямоугольных полуоткрытых и открытых пазов показаны на рис. 3.1, *б*, *в*.

3.3.1. Ширина зубца в наиболее узком месте, м:

$$b_{z1\min} = \frac{t_1 B_\delta}{k_c B_{z1\max}}, \qquad (3.35)$$

где $B_{z1\max}$ – магнитная индукция в расчетном наименьшем сечении зубца:

$$B_{z1\max} = 1{,}75\ldots1{,}95 \text{ при } 2p = 2,$$

$$B_{z1\max} = 1{,}7\ldots1{,}85 \text{ при } 2p = 4\ldots12.$$

3.3.2. Ширина полуоткрытого паза, м:

$$b_{п1} = t_1' - b_{z1\min}, \tag{3.36}$$

где t_1' – зубцовое деление на диаметре расположения клина в пазу статора:

$$t_1' = \frac{\pi\left(D_1 + 2h_{щ} + 2h_k\right)}{Z_1}, \tag{3.37}$$

где $h_{щ}$ – высота шлица, принимается для полуоткрытых пазов равной 0,01 м;

h_k – высота клина:

$$h_k = 0{,}0035 \text{ м при } 2p = 2,$$

$$h_k = 0{,}003 \text{ м при } 2p = 4\ldots12.$$

Ширина шлица (открытия) $b_{щ}$ полуоткрытого паза принимается равной примерно $0{,}6b_{п1}$.

Для полуоткрытых пазов отношение $b_{п1}/t_1'$ должно находиться в следующих пределах:

$2p$	2	4,6,8	10,12
$b_{п1}/t_1'$	0,51…0,58	0,46…0,53	0,51…0,53

3.3.3. Ширина открытого паза, м:

$$b_{п1} = t_1 - b_{z1\min}. \tag{3.38}$$

Для открытых пазов:

$$b_{п1} = (0{,}45...0{,}5)t_1 .$$

3.3.4. Размеры прямоугольных проводников.

Допустимая высота проводника с витковой изоляцией, м:

$$h' = \frac{\left(h_{п1} - h_{и} - h_k - h_{щ}\right)}{u_{в}} . \tag{3.39}$$

Допустимая ширина проводника с витковой изоляцией, м:

$$b' = \frac{b_{п1} - b_{и}}{u_{ш}} . \tag{3.40}$$

Здесь $h_{и}$ и $b_{и}$ – общая толщина изоляции, мм, в пазу статора по его высоте и ширине

$$h_{и} = 0{,}0045 \text{ м}, \ \ b_{и} = 0{,}0018\ldots0{,}0022 \text{ м};$$

$u_{в}, u_{ш}$ – число эффективных проводников соответственно по высоте и ширине паза;

при полуоткрытых пазах $u_{ш} = 2$,

при открытых пазах $u_{ш} = 1$ или 2,

$$u_{в} = \frac{u_{п}}{u_{ш}} .$$

Эффективные проводники с поперечным сечением более 10 мм^2 разбивают на несколько элементарных. Размеры неизолированных прямоугольных проводов получаются вычитанием из значений h' и b' толщины двусторонней витковой изоляции. Для проектируемых двигателей толщина двусторонней изоляции равна 0,15 мм. Выбрав стандартные размеры провода, определяют его размеры с изоляцией и уточняют размеры паза (см. табл. П-2, прил. 1):

$$\begin{gathered} h_{п1} = u_{в}h' + h_{и} + h_k + h_{щ}, \\ b_{п1} = u_{ш}b' + b_{и}. \end{gathered} \tag{3.41}$$

После чего уточняют значение индукции B_{c1} и $B_{z1\max}$.

Далее определяется плотность тока по п. 3.2.5 и тепловая нагрузка по п. 3.2.6 и в случае необходимости изменяются размеры проводника и паза.

3.3.5. Размеры обмотки.

Средняя ширина катушки $b_{\text{ср}}$ по п. 3.2.7.

Средняя длина лобовой части катушки, м:

$$l_{\text{л}1} = \frac{b_{\text{ср}}}{\sqrt{1 - \left[\dfrac{(b_{\text{п}1} + 0{,}0035)}{t_1}\right]^2}} + h_{\text{п}1} + 0{,}05\,. \tag{3.42}$$

Средняя длина витка обмотки – по п. 3.2.7.

Вылет лобовой части обмотки, м:

$$l_{\text{в}1} = \frac{\dfrac{b_{\text{ср}}(b_{\text{п}1} + 0{,}0035)}{2t_1}}{\sqrt{1 - \left[\dfrac{(b_{\text{п}1} + 0{,}0035)}{t_1}\right]^2}} + h_{\text{п}1} + 0{,}025\,. \tag{3.43}$$

4. ОБМОТКИ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА

4.1. Форма пазов ротора

Обмотка короткозамкнутых роторов двигателей с высотами оси вращения 50…355 мм выполняется заливкой пазов спрессованных сердечников алюминием марки А5.

Формы пазов ротора проектируемых двигателей приведены на рис. 4.1.

В двигателях с h = 50…132 мм выполняются овальные полузакрытые пазы (рис. 4.1, *а*),

с h = 160…225 мм, p = 2…8 и h = 250 мм, p = 4, 6, 8 – овальные закрытые (рис. 4.1, *б*),

с h = 250 мм, p = 2 и h = 280…335 мм, p = 2…8 – бутылочные закрытые (рис. 4.1, *в*).

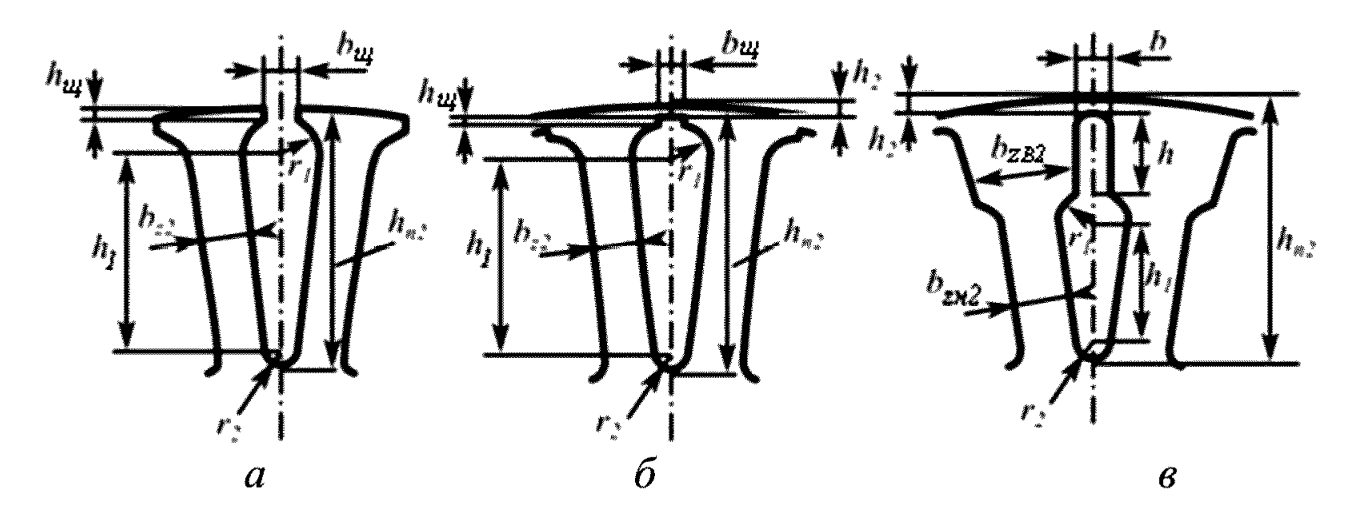


Рис. 4.1. Форма и размеры пазов короткозамкнутого ротора:
а – овального полузакрытого; *б* – овального закрытого; *в* – бутылочного закрытого

Зубцовое деление по наружному диаметру ротора, м:

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2}. \tag{4.1}$$

4.2. Размеры овальных полузакрытых и закрытых пазов ротора

Зубцы ротора двигателей с овальными пазами выполняются с равновеликим поперечным сечением по высоте.

4.2.1. Ширина зубца в расчетном сечении, м:

$$b_{z2} = \frac{t_2 B_\delta}{B_{z2} k_c}, \tag{4.2}$$

где $k_c = 0{,}95 \ldots 0{,}97$.

Магнитная индукция в расчетном сечении зубца принимается из табл. 4.1.

4.2.2. Большой радиус, м:

$$r_1 = \frac{\pi\left(D_2 - 2h_{щ} - 2h_2\right) - Z_2 b_{z2}}{2(Z_2 + \pi)}, \tag{4.3}$$

для овального полузакрытого паза $h_{щ} = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м (при h = 50…100 мм) и $h_{щ} = 0{,}75 \cdot 10^{-3}$ м (при h = 112…132 мм), $h_2 = 0$;

для овального закрытого паза $h_{щ} = 0{,}7 \cdot 10^{-3}$ м, $h_2 = 0{,}3 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблица 4.1

Средние значения магнитной индукции в зубцах короткозамкнутого ротора с овальными пазами

h, мм	50…132		160…250		280…355		
$2p$	2, 4, 6	8	2	4, 6, 8	2	4	6…12
B_{z2}, Тл	1,75…1,95	1,7…1,9	1,7…1,95	1,65…1,9	1,6…1,85	1,8…2,0	1,65…1,9

4.2.3. Высота паза $h_{п2}$ принимается из рис. 4.2.

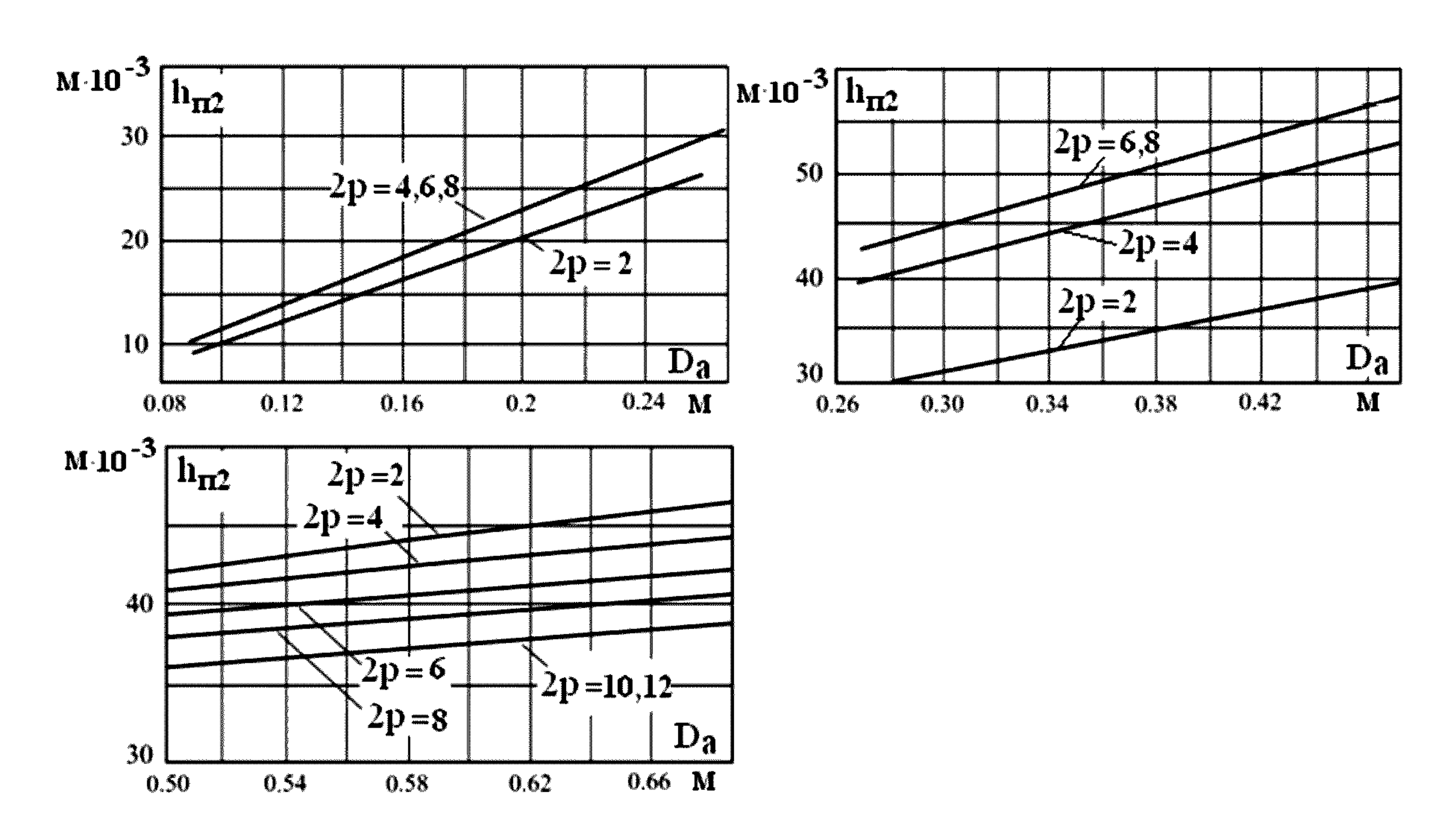


Рис. 4.2. Средние значения $h_{п2} = f(D_a)$ короткозамкнутого ротора

Проверяется магнитная индукция в спинке ротора, Тл:

$$B_{c2} = \frac{\Phi}{2k_c l_\delta h_{c2}}. \tag{4.4}$$

Расчетная высота спинки ротора, м:

При $2p = 2{,}4$ $$h_{c2} = \frac{2+p}{3{,}2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{п2}\right) - \frac{2}{3}d_{k2}; \tag{4.5}$$

$$\text{при } 2p \geq 6 \quad h_{c2} = \frac{D_2 - D_{2\text{В}}}{2} - h_{\text{п}2} - \frac{2}{3} d_{k2},$$

где d_{k2} – диаметр аксиального канала (см. табл. 2.4).

Полученное значение B_{c2} не должно превышать:

1,45 Тл при $2p = 2$;
1,25 Тл при $2p = 4$;
1,15 Тл при $2p = 6$;
0,85 Тл при $2p = 8$, 10, 12.

4.2.4. Меньший радиус, м:

$$r_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{n2}) - Z_2 b_{z2}}{2(Z_2 - \pi)}. \tag{4.6}$$

Значение r_2 не должно быть менее 1 мм у двигателей с $h = 50 \ldots 132$ и менее 2 мм с $h \geq 160$ мм; в противном случае следует уменьшить ширину зубца b_{z2} и повысить индукцию в зубце B_{z2}.

4.2.5. Расстояние между центрами радиусов, м:

$$h_1 = h_{\text{п}2} - h_{\text{щ}} - h_2 - r_1 - r_2. \tag{4.7}$$

4.2.6. Площадь поперечного сечения паза, равная площади поперечного сечения стержня обмотки, м^2:

$$Q_{\text{п}2} = q_{\text{ст}} = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + (r_1 + r_2) h_1. \tag{4.8}$$

Для овального полузакрытого паза $b_{\text{щ}} = 0{,}001$ м (при $h = 50 \ldots 100$ мм) и 0,0015 м (при $h = 112 \ldots 132$ мм), для овального закрытого паза $b_{\text{щ}} = 0{,}0015$ м.

4.3. Размеры бутылочных закрытых пазов ротора

Нижняя часть зубцов ротора двигателей с бутылочным закрытым пазом выполняется с равновеликим поперечным сечением по высоте.

4.3.1. Ширина зубца $b_{z\text{н}2}$ в нижней части – согласно п. 4.2.1.

4.3.2. Большой радиус нижней части паза, м:

$$r_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_2 - 2h) - Z_2 b_{zн2}}{2(Z_2 + \pi)}, \qquad (4.9)$$

где $h = (0{,}2...0{,}5)\ 10^{-3}$ м, $h = 0{,}015$ м.

4.3.3. Высота паза $h_{п2}$ принимается из рис. 4.2 и проверяется магнитная индукция B_{c2} в спинке ротора по п. 4.2.3.

4.3.4. Меньший радиус, м:

$$r_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{п2}) - Z_2 b_{zн2}}{2(Z_2 - \pi)}. \qquad (4.10)$$

Значение r_2 должно быть не менее 2 мм, в противном случае следует уменьшить ширину зубца $b_{zн2}$ и повысить магнитную индукцию в зубцах $B_{zн2}$.

4.3.4. Расстояние между центрами радиусов, м:

$$h_1 = h_{п2} - h_2 - h - r_1 - r_2. \qquad (4.11)$$

4.3.5. Площадь поперечного сечения нижней части стержня, м^2:

$$q_{ст.н} = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + (r_1 + r_2)h_1. \qquad (4.12)$$

4.3.6. Площадь поперечного сечения верхней части стержня, м^2:

$$q_{ст.в} = b(h - 0{,}11b), \qquad (4.13)$$

где ширина верхней части стержня $b \approx (1...1{,}25) \cdot 10^{-3} \cdot r_1$ м.

4.3.7. Общая площадь поперечного сечения стержня, м^2:

$$q_{ст} = Q_{п2} = q_{ст.н} + q_{ст.в}. \qquad (4.14)$$

4.4. Размеры короткозамыкающего кольца

4.4.1. Поперечное сечение литой клетки (рис. 4.3), м^2:

$$q_{\text{кл}} = \frac{(0,35...0,45) Z_2 q_{\text{ст}}}{2p}. \qquad (4.15)$$

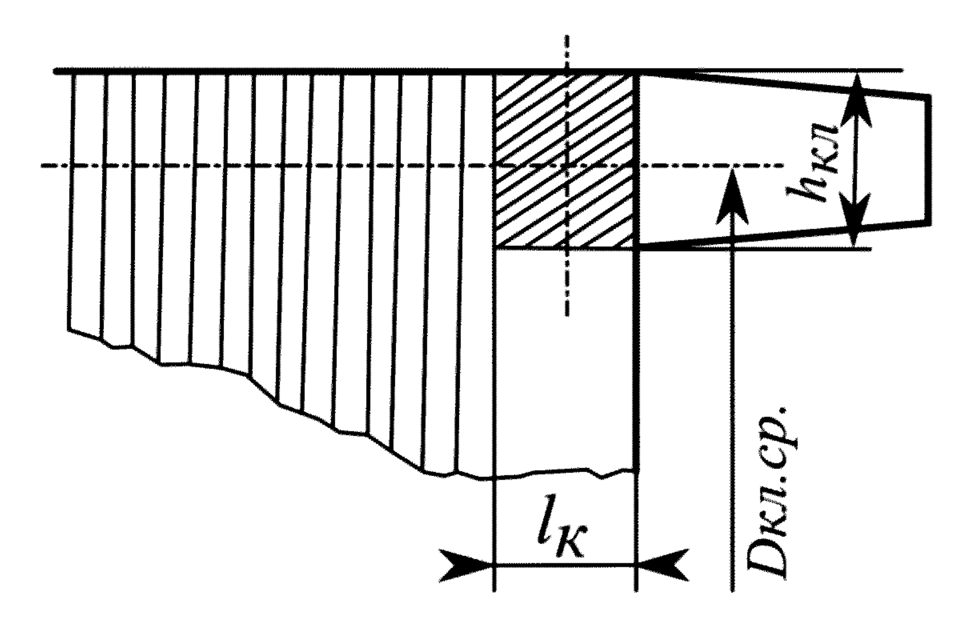


Рис. 4.3. Размеры короткозамыкающего кольца

4.4.2. Высота кольца литой клетки, м:

$$h_{\text{кл}} = (1,2...1,25) h_{\text{п}2}. \qquad (4.16)$$

4.4.3. Длина кольца, м:

$$l_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}}. \qquad (4.17)$$

4.4.4. Средний диаметр кольца литой клетки, м:

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}}. \qquad (4.18)$$

5. РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

5.1. Параметры обмотки статора

5.1.1. Активное сопротивление фазы обмотки статора, Ом:

$$r_1 = \rho \frac{W_1 l_{\text{ср}1}}{a_1 \cdot q}, \tag{5.1}$$

где W_1 – см. п. 3.1.7;

$l_{\text{ср}1}$ [м] – см. п. 3.2.7;

q – [м^2].

В соответствии с ГОСТ 183-74 для машин, предельно допускаемые температуры обмоток которых соответствуют классы нагревостойкости Е и В, принимается расчетная рабочая температура, равная 75 °С; для машин, предельно допускаемые превышения температуры обмоток которых соответствуют классам нагревостойкости F и H, – 115 °С. В соответствии с этим для меди

$$\rho_{75^\circ} = 1/46 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad \rho_{115^\circ} = 1/41 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Активное сопротивление обмотки фазы, выраженное в относительных единицах:

$$r_{1*} = \frac{r_1 I_{1\text{н}}}{U_1}. \tag{5.2}$$

5.1.2. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора

При определении индуктивного сопротивления рассеяния обмоток условно различают три основных вида полей рассеяния: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждого из этих полей определяют магнитную проводимость и после суммирования этих проводимостей вычисляют индуктивное сопротивление рассеяния обмотки.

Магнитная проводимость пазового рассеяния для диаметральных обмоток зависит только от геометрических размеров паза. Укорочение обмоток учитывается введением коэффициентов k_β и k'_β.

Коэффициент проводимости рассеяния пазов:

- трапецеидального полузакрытого (рис. 5.1, *а*):

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_1}{3b_2}k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_2} + \frac{3h_k}{b_2 + 2b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}}\right)k'_\beta, \tag{5.3}$$

где высота клина h_k принимается равной 2,5…3,5 мм, размеры паза – см. п. 3.2 и 3.3, размеры h_1, h_2 и h_3 определяются из эскиза паза с размещенной обмоткой;

- прямоугольного полузакрытого (рис. 5.1, *б*):

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{п}1}}k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_{\text{п}1}} + \frac{3h_k}{b_{n1} + 2b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}}\right)k'_\beta + \frac{h_3}{4b_{\text{п}1}}; \tag{5.4}$$

- прямоугольного открытого (рис. 5.1, *в*):

$$\lambda_{\text{п}1} = \frac{h_1 - h_3}{3b_{\text{п}1}}k_\beta + \frac{h_2 + h_k + h_{\text{щ}}}{b_{\text{п}1}}k'_\beta + \frac{h_3}{4b_{\text{п}1}}. \tag{5.5}$$

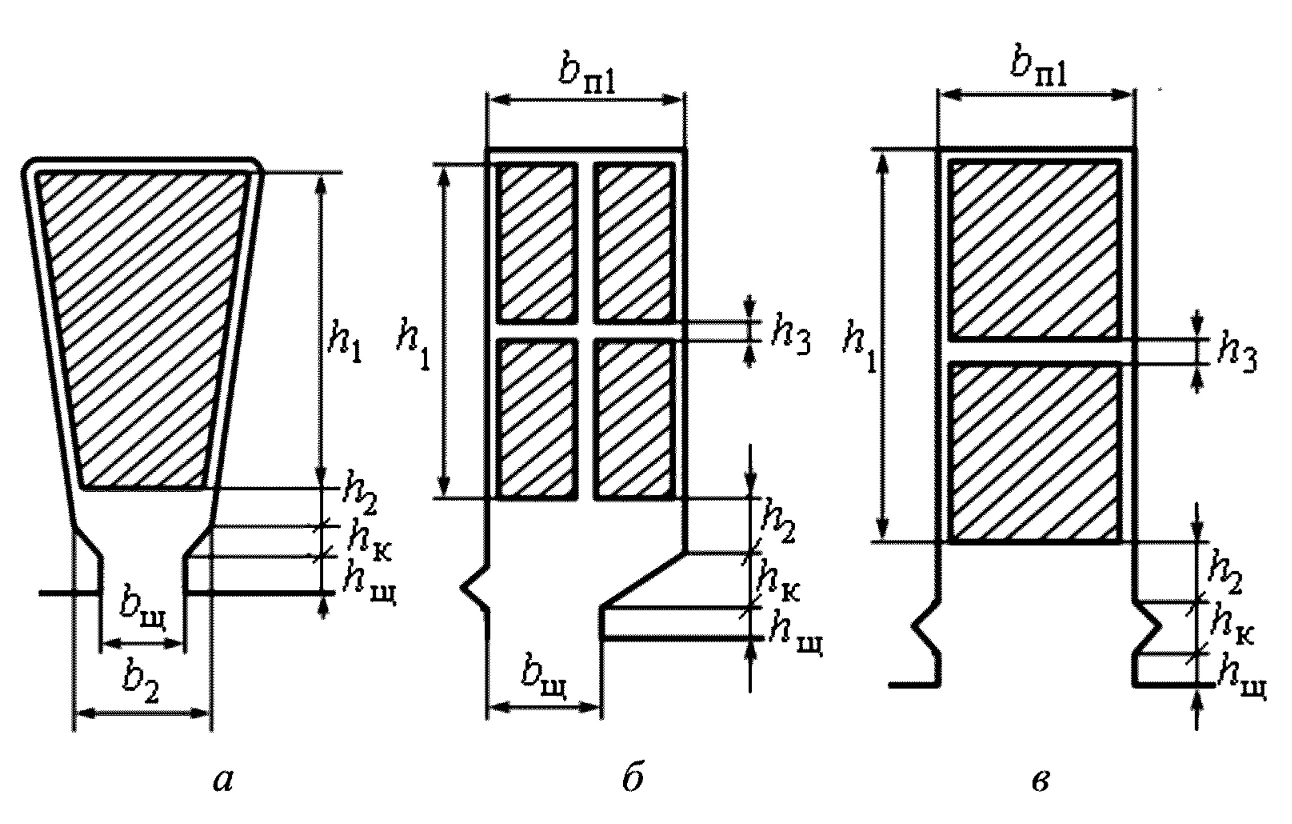


Рис. 5.1. Размеры паза статора с обмоткой:
а – трапецеидального полузакрытого; *б* – прямоугольного полуоткрытого; *в* – прямоугольного открытого

Значения коэффициентов k_β и k'_β принимаются по рис. 5.2.

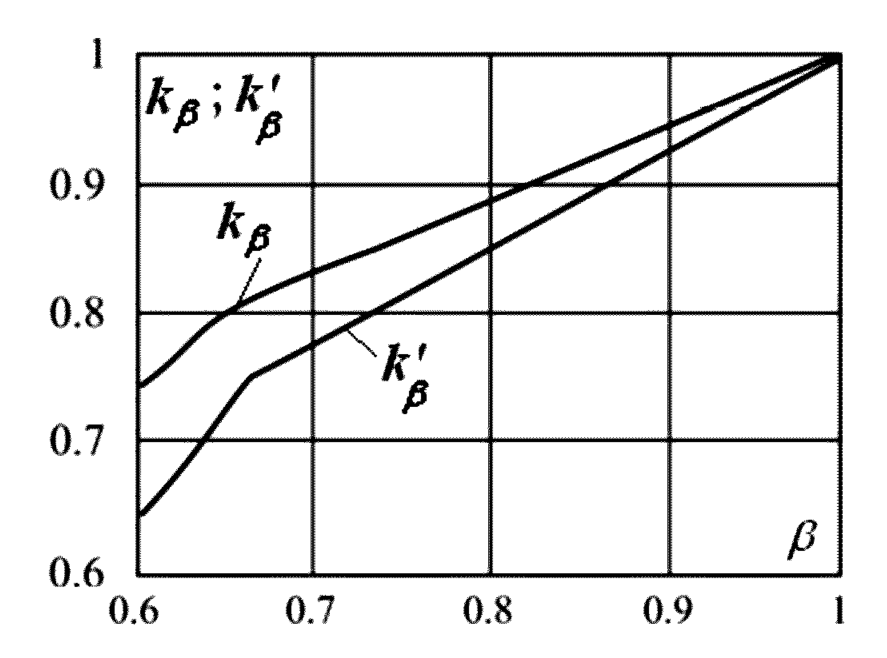


Рис. 5.2. Средние значения k_β и $k'_\beta = f(\beta)$

Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей обмотки статора зависит от вида обмотки, длины лобовых частей, укорочения шага и определяется выражением:

$$\lambda_{\text{л}1} = 0,34\frac{q_1}{l_\delta}(l_{\text{л}1} - 0,64\beta\tau). \tag{5.6}$$

Дифференциальное рассеяние обусловлено высшими гармониками магнитного поля в воздушном зазоре.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора:

$$\lambda_{\text{д}1} = \frac{0,9t_1(q_1 k_{\text{об}1})^2 k_{\text{р}1} k_{\text{щ}1} k_{\text{д}1}}{\delta k_\delta}, \tag{5.7}$$

где $k_{\text{р}1}$ – коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора; значения $k_{\text{р}1}$ приведены в табл. 5.1;

$k_{щ1}$ – коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния:

$$k_{щ1} = 1 - \frac{0,033 b_{щ}^{2}}{t_1 \delta}, \qquad (5.8)$$

$b_{щ}$ – шлица паза статора, м;

k_{δ} – коэффициент воздушного зазора (п. 6.1);

$k_{д1}$ – коэффициент дифференциального рассеяния статора, равный отношению суммы ЭДС, наведенных высшими гармониками поля статора, и ЭДС, наведенной первой гармоникой того же поля.

Значения $k_{д1}$ приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.1

Значения коэффициента k_{p1}

q_1	Коэффициенты k_{p1} при Z_2/p						
	10	15	20	25	30	35	40
2	0,99/0,94	0,94/0,87	–	–	–	–	–
3	0,98/0,42	0,93/0,87	0,88/0,84	0,85/0,78	–	–	–
4	–	0,9/0,81	0,84/0,77	0,8/0,75	0,77/0,72	–	–
5	–	–	–	0,75/0,69	0,72/0,67	0,7/0,65	–
6	–	–	–	0,7/0,62	0,66/0,6	0,62/0,58	–
8	–	–	–	–	–	0,53/0,47	0,51/0,46

Примечания. 1. В числителе приведены значения k_{p1} при скосе пазов $b_c = t_2$, а в знаменателе – при отсутствии скоса пазов. 2. Для значений z_2/p, отличающихся от приведенных в таблице, и для дробных q_1 коэффициент следует определять интерполяцией.

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора:

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}. \qquad (5.9)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, Ом:

$$x_1 = \frac{1{,}58 f_1 l_\delta W_1^2}{p q_1 \cdot 10^5} \lambda_1, \qquad (5.10)$$

в относительных единицах:

$$x_{1*} = \frac{x_1 I_{1н}}{U_1}. \qquad (5.11)$$

Таблица 5.2

Значения коэффициентов $k_{д1}$

q_1	Двухслойная обмотка с укороченным шагом		Однослойная обмотка
	β	$k_{д1}$	$k_{д1}$
1,5	0,89	0,045	–
2	0,833	0,0235	0,0285
2,5	0,8	0,017	–
3	0,778	0,0111	0,0141
4	0,833	0,0062	0,0089
5	0,8	0,0043	0,0065
6	0,833	0,003	0,0052
8	0,792	0,0021	–

5.2. Параметры обмотки короткозамкнутого ротора

***Ротор с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами* (рис. 4.1, *а*, *б*)**

5.2.1. Активное сопротивление стержня клетки, Ом:

$$r_{ст} = \rho \frac{l_\delta}{q_{ст}} k_{в.т.}, \qquad (5.12)$$

где ρ – для алюминия $\rho_{115^\circ} = 1/22 \cdot 10^{-6}$ Ом · м ;

$k_{\text{в.т.}}$ – коэффициент вытеснения тока при частоте $f_2 = sf_1$, для рабочего режима $k_{\text{в.т.}} = 1$.

5.2.2. Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, Ом:

$$r_{\text{кл}} = \rho \frac{2\pi D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 q_{\text{кл}} k_{\text{пр2}}^2}, \qquad (5.13)$$

где $k_{\text{пр2}}$ – коэффициент приведения тока кольца к току стержня:

$$k_{\text{пр2}} = 2\sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right). \qquad (5.14)$$

5.2.3. Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом:

$$r_2' = k_{\text{пр1}}(r_{\text{ст}} + r_{\text{кл}}), \qquad (5.15)$$

в относительных единицах

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1\text{н}}}{U_1}, \qquad (5.16)$$

где $k_{\text{пр1}}$ – коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора:

$$k_{\text{пр1}} = \frac{4m_1}{Z_2}(W_1 k_{\text{об1}})^2. \qquad (5.17)$$

5.2.4. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора, Ом:

$$x_2 = 7{,}9 f_1 l_\delta \lambda_2 \cdot 10^{-6}, \qquad (5.18)$$

где λ_2 – коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора:

$$\lambda_2 = \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{кл}}. \qquad (5.19)$$

Коэффициент проводимости рассеяния пазов:
овального полузакрытого (рис. 4.1, *а*):

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1 + 0{,}8r_2}{6r_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2q_{ст}} \right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_щ}{4r_1} \right] \psi + \frac{h_щ}{b_щ}, \qquad (5.20)$$

овального закрытого (рис. 4.1, *б*):

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1 + 0{,}8r_2}{6r_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2q_{ст}} \right)^2 + 0{,}66 - \frac{b_щ}{4r_1} \right] \psi + 0{,}3 + 1{,}12 \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2}, \qquad (5.21)$$

где ψ – коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока, для рабочего режима $\psi = 1$.

Для рабочего режима значение тока стержня ротора, А:

$$I_2 = \frac{2W_1 P_1 (0{,}2 + 0{,}8\cos\varphi)}{U_1 Z_2}. \qquad (5.22)$$

Значения P_1 и $\cos\varphi$ соответствуют ранее принятым.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{д2} = \frac{0{,}9t_2 \left(\frac{Z_2}{6p} \right)^2 k_{д2}}{\delta k_\delta}, \qquad (5.23)$$

где $k_{д2}$ – коэффициент дифференциального рассеяния ротора определяется по рис. 5.3 при $q_2 = Z_2/6p$.

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец:

$$\lambda_{кл} = \frac{2{,}3D_{кл.ср}}{Z_2 l_2 k_{пр2}^2} \lg \frac{4{,}7D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2l_{кл}}. \qquad (5.24)$$

Принять длину l_2 равной l_δ.

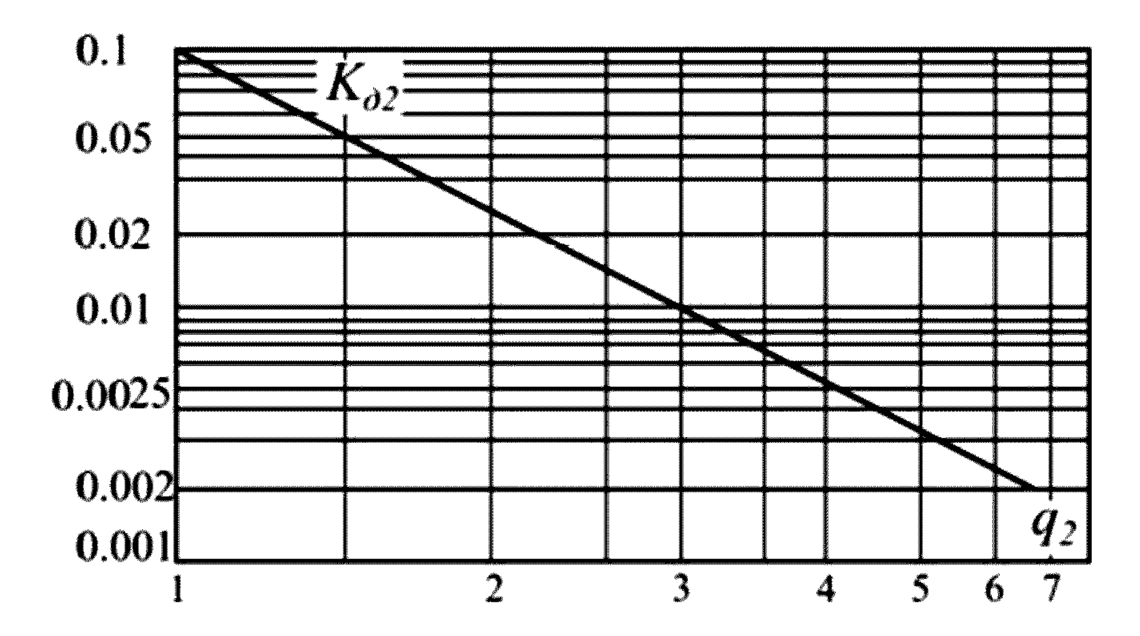


Рис. 5.3. Коэффициент $k_{д2} = f(q_2)$

5.2.5. Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, Ом:

$$x'_2 = k_{пр1} x_2 , \tag{5.25}$$

в относительных единицах

$$x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1н}}{U_1} . \tag{5.26}$$

Ротор с бутылочными закрытыми пазами **(рис. 4.1, *в*)**

5.2.6. Активные сопротивления верхней и нижней части стержня, Ом:

$$r_{ст.в} = \rho \frac{l_2}{q_{ст.в}}; \quad r_{ст.н} = \rho \frac{l_2}{q_{ст.н}} k_{в.т.н} , \tag{5.27}$$

где $k_{в.т.н}$ – коэффициент вытеснения тока в нижней части стержня (для рабочего режима $k_{в.т.н} = 1$).

Активные сопротивления верхней и нижней части, приведенные к статору, Ом:

$$r'_в = k_{пр1} r_{ст.в}; \quad r'_н = k_{пр1} r_{ст.н} . \tag{5.28}$$

Активное сопротивление общей цепи ротора, приведенное к статору, Ом:

$$r'_{\text{о}} = k_{\text{пр}1} r_{\text{кл}}, \tag{5.29}$$

где $r_{\text{кл}}$ – по п. 5.2.2.

Активное результирующее сопротивление, Ом:

$$r'_2 = r'_{\text{о}} + \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2 r'_{\text{н}}, \tag{5.30}$$

где $\alpha = \dfrac{q_{\text{ст.н}}}{q_{\text{ст.в}}} = \dfrac{r'_{\text{в}}}{r'_{\text{н}}}$.

5.2.7. Индуктивное сопротивление рассеяния цепи ротора определяется в следующем порядке.

Коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки:

$$\lambda_{2\text{н}} = \lambda_{\text{п.н}} = \left[\frac{h_1 + 0{,}8r_2}{6r_1}\left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2q_{\text{ст.н}}}\right)^2 + 0{,}66 - \frac{b}{4r_1}\right]\psi'' +$$

$$+\frac{h - 0{,}18 \cdot 10^{-3}}{2b}. \tag{5.31}$$

Для рабочего режима $\psi'' = 1$.

Коэффициент проводимости рассеяния взаимной индукции нижнего и верхнего пазов:

$$\lambda_{\text{н.в}} = \frac{h - 0{,}1b}{2b} + 1{,}09 + 1{,}12\,\frac{h_2}{I_2}10^3, \tag{5.32}$$

где I_2 определяется по п. 5.2.4.

Коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора:

$$\lambda_{2\text{о}} = \lambda_{\text{н.в}} + \lambda_{\text{д}2} + \lambda_{\text{кл}}, \tag{5.33}$$

где $\lambda_{\text{д}2}$ и $\lambda_{\text{кл}}$ определяются по п. 5.2.4.

Индуктивное сопротивление нижней части, приведенное к статору, Ом:

$$x'_{\text{н}} = x_1 \frac{\lambda'_{2\text{н}}}{\lambda_1}, \tag{5.34}$$

где $\lambda'_{2\text{н}}$ – приведенный коэффициент проводимости рассеяния нижней части клетки:

$$\lambda'_{2\text{н}} = \lambda_{2\text{н}} \frac{l_2 Z_1}{l_\delta Z_2} k^2_{\text{об}1}. \tag{5.35}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния общей цепи ротора, приведенное к статору, Ом:

$$x'_{\text{о}} = \frac{x_1 \lambda'_{2\text{о}}}{\lambda_1}, \tag{5.36}$$

где $\lambda'_{2\text{о}}$ – приведенный коэффициент проводимости рассеяния общей цепи ротора:

$$\lambda'_{2\text{о}} = \lambda_{2\text{о}} \frac{l_2 Z_1}{l_\delta Z_2} k_{\text{об}1}. \tag{5.37}$$

Индуктивное результирующее сопротивление рассеяния, Ом:

$$x'_2 = x'_{\text{о}} + x'_{\text{н}} \left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right)^2, \tag{5.38}$$

где $\alpha = \frac{q_{\text{ст.н}}}{q_{\text{ст.в}}}$ (для рабочего режима).

6. НАМАГНИЧИВАЮЩИЙ ТОК

Расчет намагничивающего тока асинхронной машины основан на законе полного тока:

$$\oint_L Hdl = \sum i . \qquad (6.1)$$

На практике прибегают к упрощенному вычислению интеграла, разбивая магнитную цепь на участки l_x с примерно постоянной напряженностью поля H_x вдоль участка. Тогда вместо интеграла получим:

$$\sum H_x l_x = \sum F . \qquad (6.2)$$

Магнитную цепь асинхронной машины принято разбивать на пять участков: воздушный зазор δ, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора, спинка ротора.

Суммарная МДС всех участков:

$$\sum F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} . \qquad (6.3)$$

Расчет намагничивающего тока ведется только для номинального режима работы двигателя.

6.1. Воздушный зазор

Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс, А:

$$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^6 , \qquad (6.4)$$

где k_δ – коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора зубчатости статора и ротора:

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2};$$

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{щ}}{t_1 - b_{щ} + \dfrac{5\delta \cdot t_1}{b_{щ}}}; \quad k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{щ}}{t_2 - b_{щ} + \dfrac{5\delta \cdot t_2}{b_{щ}}}. \qquad (6.5)$$

В данные формулы подставляют $b_щ$ паза статора и $b_щ$ паза ротора соответственно.

При открытых пазах статора и ротора вместо ширины щели подставляют ширину паза соответственно.

6.2. Зубцы статора

6.2.1. Трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 3.1, *а*).

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца, Тл:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_1}{b_{z1} k_c}. \tag{6.6}$$

Определяется напряженность магнитного поля в зубце H_z при $B_{z1} \le 1{,}8$ Тл по табл. П-3 (прил. 1); при $B_z > 1{,}8$ Тл по рис. П-4 (прил. 1) в зависимости от коэффициента k_z, учитывающего ответвление магнитного потока в паз статора. Коэффициент k_z определяется на 1/3 высоты зубца, считая от наиболее узкой части паза:

$$k_{z(1/3)} = \frac{t_{1(1/3)}}{b_{z1} k_c}, \tag{6.7}$$

где $t_{1(1/3)} = \dfrac{\pi\left(D_1 + \frac{2}{3} h_{п1}\right)}{Z_1}$.

Магнитное напряжение зубца статора, А:

$$F_{z1} = H_{z1} h_{п1}. \tag{6.8}$$

6.2.2. Прямоугольные полуоткрытые и открытые пазы (рис. 3.1, *б*, *в*).

При $B_{z1\max} \le 1{,}8 Тл$:

$$b_{z1(1/3)} = \frac{\pi\left(D_1 + \frac{2}{3} h_{п1}\right)}{Z_1} - b_{п1}. \tag{6.9}$$

Магнитная индукция в расчетном сечении, Тл:

$$B_{z1(1/3)} = \frac{t_1 B_\delta}{b_{z1(1/3)} k_c}. \quad (6.10)$$

Напряженность поля определяется по табл. П-3 (прил. 1).

При $B_{z1\max} > 1{,}8$ Тл напряженность поля определяют в трех поперечных сечениях зубца – минимальном, среднем и максимальном.

Ширина зубца в расчетных сечениях, м:

$$b_{z1\max} = \frac{\pi(D_1 - 2h_{\text{п}1})}{Z_1} - b_{\text{п}1}; \quad b_{z1\text{ср}} = \frac{(b_{z1\max} + b_{z1\min})}{2}, \quad (6.11)$$

где $b_{z1\min}$ – по п. 3.3.1.

Магнитная индукция в расчетных сечениях, Тл:

$$B_{z1\min} = B_{z1\max}\left(\frac{b_{z1\min}}{b_{z1\max}}\right); \quad B_{z1\text{ср}} = B_{z1\max}\frac{b_{z1\text{ср}}}{b_{z1\max}}, \quad (6.12)$$

где $B_{z1\max}$ – по п. 3.3.1.

При индукциях в сечениях зубца, превышающих 1,8 Тл, напряженности поля определяют по рис. П-4 (прил. 1) в зависимости от k_{z1}, принимающего следующие значения:

для $B_{z1\max}$ $\quad k_{z1\max} = \dfrac{t_{1\min}}{bz_{z1\min} k_c}$;

для $B_{z1\min}$ $\quad k_{z1\min} = \dfrac{t_{1\max}}{b_{z1\max} k_c}$;

для $B_{z1\text{ср}}$ $\quad k_{z1\text{ср}} = \dfrac{k_{z1\max} + k_{z1\min}}{2}$.

Расчетное значение напряженности поля, А/м:

$$H_{z1} = \frac{H_{z1\max} + 4H_{z1\text{ср}} + H_{z1\min}}{6}. \quad (6.13)$$

Магнитное напряжение зубцов – по п. 6.2.1.

6.3. Зубцы ротора

6.3.1. Овальные полузакрытые и закрытые пазы (рис. 4.1, *а*, *б*).

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца B_{z2} – по п. 6.2.1.

При $B_{z2} \le 1{,}8\,\text{Тл}$ напряженность поля принимается по табл. П-3 (прил. 1), при $B_{z2} > 1{,}8$ Тл – из рис. П-4 (прил. 1), причем коэффициент

$$k_{z(1/3)} = \frac{t_{2(1/3)}}{b_{z2} k_c}; \quad t_{2(1/3)} = \frac{\pi\left(D_2 - \frac{4}{3} h_{\text{п}2}\right)}{Z_2}. \qquad (6.14)$$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце, м:

$$L_{z2} = h_{\text{п}2} - 1{,}2 r_2. \qquad (6.15)$$

Магнитное напряжение в зубце ротора, А:

$$F_{z2} = H_{z2} L_{z2}. \qquad (6.16)$$

6.3.2. Бутылочные закрытые пазы (рис. 4.1, *в*).

Средняя ширина зубца верхней части паза, м:

$$b_{z\text{в}2} = \frac{\pi(D_2 - 2h_2 - h)}{Z_2} - b. \qquad (6.17)$$

Магнитная индукция в среднем сечении зубца верхней части паза, Тл:

$$B_{z\text{в}2} = \frac{B_\delta t_2}{b_{z\text{в}2} k_c}. \qquad (6.18)$$

Напряженность магнитного поля – по табл. П-3 (прил. 1).

Расчетная длина магнитной силовой линии, м:

$$L_{z\text{в}2} = h_2 + h. \qquad (6.19)$$

Магнитное напряжение зубцов верхней части паза, А:

$$F_{z\text{в}2} = H_{z\text{в}2} L_{z\text{в}2}. \qquad (6.20)$$

Магнитная индукция в равновеликом сечении зубца нижней части паза $B_{z\text{н}2}$ определяется по формуле п. 4.2.1.

Напряженность магнитного поля в зубце нижней части паза при $B_{z\text{н}2} \le 1{,}8$ Тл находят так же, как для зубцов ротора с овальными пазами. При $B_{z\text{н}2} > 1{,}8$ Тл коэффициент

$$k_{z(1/3)} = \frac{t_{\text{н}2(1/3)}}{b_{z\text{н}2} k_c}, \qquad (6.21)$$

где $t_{\text{н}2(1/3)} = \dfrac{\pi\left[D_2 - \frac{4}{3} h_{\text{п}2} - \frac{2}{3}(h_2 + h)\right]}{Z_2}$.

Расчетная длина магнитной силовой линии в нижней части зубца, м:

$$L_{z\text{н}2} = r_1 + h_1 + 0{,}8 r_2. \qquad (6.22)$$

Магнитное напряжение нижней части зубцов, А:

$$F_{z\text{н}2} = H_{z\text{н}2} L_{z\text{н}2}. \qquad (6.23)$$

Магнитное напряжение зубцов ротора, А:

$$F_{z2} = F_{z\text{в}2} + F_{z\text{н}2}. \qquad (6.24)$$

6.4. Спинка статора

Индукция в спинке B_{c1} постоянна вдоль полюсного деления. Максимальное значение индукции в спинке статора – по п. 3.1.13.

Предполагая синусоидальное распределение индукции в спинке вдоль расчетной силовой линии, можно определить среднюю напря-

женность магнитного поля в спинке H_{c1}, используя формулу Симпсона:

$$H_{c1} = \frac{1}{18}[H(B_{c1}) + 4H(B_{c1} \cdot \sin 75°) + 2H(B_{c1} \cdot \sin 60°) +$$

$$+ 4H(B_{c1} \cdot \sin 45°) + 2H(B_{c1} \cdot \sin 30°) + 4H(B_{c1} \cdot \sin 15°)], \quad (6.25)$$

где $H(B_{c1})$ – определяется по табл. П-3 (прил. 1).

Для двигателей с 2р = 2 напряженность магнитного поля в спинке определяется для индукции $B_{c1} = 0,45$ Тл.

Расчетная длина магнитной силовой линии, м:

$$L_{c1} = \frac{\pi(D_a - h_{c1})}{4p}. \quad (6.26)$$

Магнитное напряжение спинки статора, А:

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1}. \quad (6.27)$$

6.5. Спинка ротора

Максимальное значение индукции в спинке ротора – по п. 4.2.3.
Средняя напряженность магнитного поля – по п. 6.4.
Расчетная длина магнитной силовой линии, м:
при $2p = 2$

$$L_{c2} = 2h_{c2}; \quad (6.28)$$

при $2p \geq 4$

$$L_{c2} = \frac{\pi\left(D_{2B} + h_{c2} + \frac{4}{3} d_{k2}\right)}{4p}.$$

Магнитное напряжение спинки ротора, А:

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2}. \quad (6.29)$$

6.6. Параметры магнитной цепи

Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс, А:

$$\sum F = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2}. \qquad (6.30)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{\sum F}{F_{\delta}}. \qquad (6.31)$$

Намагничивающий ток, А:

$$I_{\mu} = \frac{2{,}22\sum F \cdot p}{m_1 W_1}, \qquad (6.32)$$

в процентах номинального тока:

$$I_{\mu\%} = \frac{I_{\mu} \cdot 100}{I_{1\text{н}}}. \qquad (6.33)$$

Главное индуктивное сопротивление, Ом:

$$x_m = \frac{E}{I_{\mu}}, \qquad (6.34)$$

где $E = k_e U_1$;

в относительных единицах:

$$x_{m*} = x_m \frac{I_{1\text{н}}}{U_1}. \qquad (6.35)$$

Коэффициент рассеяния статора:

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m}. \qquad (6.36)$$

Коэффициент сопротивления статора:

$$\rho_1 = \frac{r_1}{x_1 + x_m}. \qquad (6.37)$$

7. РЕЖИМ ХОЛОСТОГО ХОДА

7.1. Реактивная составляющая тока холостого хода, А:

$$I_{op} \approx I_{\text{с.р}} = \frac{U_1}{x_m(1+\tau_1)\left(1+\rho_1^2\right)}. \quad (7.1)$$

Если коэффициент сопротивления статора $\rho_1 \leq 0{,}1$, то принимать $\rho_1^2 = 0$.

7.2. Электрические потери в обмотке статора, Вт:

$$P_{c.\text{м}1} = m_1 I_{0p}^2 r_1 \left(1+\rho_1^2\right). \quad (7.2)$$

7.3. Магнитные потери в зубцах статора, Вт:

$$P_{z1} = 1{,}7\, p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} B_{z1cp}^2 G_{z1}, \quad (7.3)$$

где коэффициент 1,7 учитывает влияние технологического процесса изготовления сердечника статора, а также неравномерности распределения индукции;

$p_{1,0/50}$ = 2,5 Вт/кг – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл.

G_{z1} – расчетная масса стали зубцов статора, кг:

при трапецеидальных полузакрытых пазах:

$$G_{z1} = 7{,}8 Z_1 b_{z1} h_{\text{п}1} l_\delta k_c \cdot 10^3; \quad (7.4)$$

при прямоугольных полуоткрытых и открытых пазах:

$$G_{z1} = 7{,}8 Z_1 b_{z1cp} h_{\text{п}1} l_\delta k_c \cdot 10^3. \quad (7.5)$$

7.4. Магнитные потери в спинке статора, Вт:

$$P_{c1} = 1{,}7\, p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} B_{c1} G_{c1}, \quad (7.6)$$

где значение $p_{1,0/50}$ = 2,5 Вт/кг;

G_{c1} – расчетная масса спинки статора, кг:

$$G_{c1} = 7{,}8\pi(D_{\text{a}} - h_{c1})h_{c1}l_{\delta}k_c \cdot 10^3. \quad (7.7)$$

7.5. Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, включающие добавочные потери в стали, Вт:

$$\sum P_{cm} = P_{z1}\left(1 + 2\sqrt{\frac{t_1}{10}(k_{\delta} - 1)^3}\right) + P_{\text{c}1}. \quad (7.8)$$

7.6. Механические потери, Вт:

$$\sum P_{\text{мх}} = k_{\text{мх}}\left(\frac{n}{10}\right)^2 D_a^4, \quad (7.9)$$

где $k_{\text{мх}} = 1{,}3(1 - D_a)$ при $2p \geq 4$ и $k_{\text{мх}} = 1$ при $2p = 2$.

7.7. Активная составляющая тока холостого хода, А:

$$I_{oa} = \frac{P_{c.\text{м}1} + \sum P_{cm} + \sum P_{\text{мх}}}{m_1 U_1}. \quad (7.10)$$

7.8. Ток холостого хода, А:

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2}. \quad (7.11)$$

7.9. Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos\varphi_o = \frac{I_{oa}}{I_o}. \quad (7.12)$$

8. НОМИНАЛЬНЫЙ РЕЖИМ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Рабочие характеристики асинхронных двигателей могут быть построены либо с помощью круговых диаграмм, либо аналитическим путем по схеме замещения. В настоящем проекте в основу расчетного

определения рабочих пусковых характеристик положена схема замещения, изображенная на рис. 8.1.

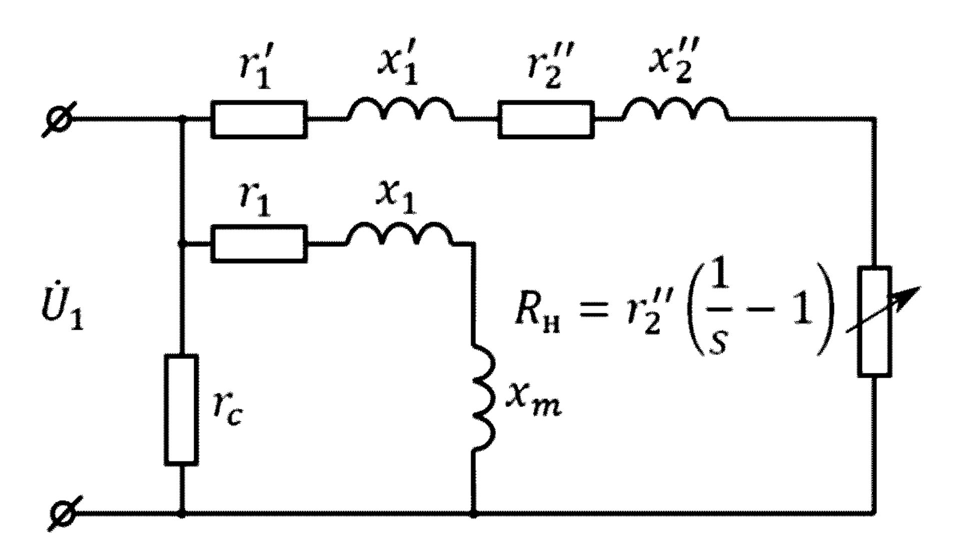


Рис. 8.1. Упрощенная схема замещения

Магнитные потери в сердечнике учтены эквивалентным сопротивлением r_c, включенным непосредственно на выводы. Это сделано с допущением, что потери в стали создаются магнитным потоком, соответствующим полному потокосцеплению обмотки статора.

8.1. Параметры схемы замещения, Ом:

$$
\begin{aligned}
r_1' &= r_1;\\
x_1' &= x_1\left(1+\tau_1\right)\left(1+\frac{r_1\rho_1}{x_1}\right);\\
r_2'' &= r_2'\left(1+\tau_1\right)^2\left(1+\rho_1^2\right);\\
x_2'' &= x_2'\left(1+\tau_1\right)^2\left(1+\rho_1^2\right).
\end{aligned}
\tag{8.1}
$$

8.2. Расчетные параметры короткого замыкания, Ом:

$$
\begin{aligned}
r_k &= r_1' + r_2'';\\
x_k &= x_1' + x_2'';\\
Z_k &= \sqrt{r_k^2 + x_k^2}.
\end{aligned}
\tag{8.2}
$$

8.3. Полное сопротивление схемы замещения при бесконечно большом скольжении, Ом:

$$Z_\infty = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \,. \tag{8.3}$$

8.4. Механическая мощность двигателя, Вт:

$$P_2' = P_2 + \sum P_{\text{мх}} + P_{\text{д}} \,, \tag{8.4}$$

где $P_{\text{д}}$ – добавочные потери при номинальной нагрузке, Вт:

$$P_{\text{д}} = 0{,}005 \frac{P_2}{\eta} \,. \tag{8.5}$$

8.5. Сопротивление схемы замещения $R_{\text{н}}$, Ом:

$$R_{\text{н}} = \frac{m_1 U_1^2}{2P_2'} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m_1 U_1^2}{2P_2'} - r_k\right)^2 - Z_k^2} \,. \tag{8.6}$$

8.6. Полное сопротивление схемы замещения:

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{(R_{\text{н}} + r_k)^2 + x_k^2} \,. \tag{8.7}$$

8.7. Скольжение:

$$S_{\text{н}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{н}}}{r_2''}} \,. \tag{8.8}$$

8.8. Активная и реактивная составляющие тока статора при синхронном вращении, А:

$$I_{c.a} = \frac{P_{\text{с.м}1} + \sum P_c}{m_1 U_1}; \quad I_{c.p} = \frac{U_1}{x_m \cdot (1 + \tau_1) \cdot \left(1 + \rho_1^2\right)} \,. \tag{8.9}$$

8.9. Расчетный ток ротора, А:

$$I_2'' = \frac{U_1}{Z_{\text{н}}} \,. \tag{8.10}$$

8.10. Фазный ток статора, А:

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2}\,, \tag{8.11}$$

где I_{a1} и I_{p1} – активная и реактивная составляющие тока статора:

$$\mathrm{I_{a1}} = I_{c.a} + I_2''\left(\frac{R_{\text{н}} + r_k}{Z_{\text{н}}}\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_{\text{н}}}\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right);$$

$$I_{p1} = I_{c.p} + I_2''\left(\frac{x_k}{Z_{\text{н}}}\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} - \frac{R_{\text{н}} + r_k}{Z_{\text{н}}}\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right). \tag{8.12}$$

8.11. Коэффициент мощности:

$$\cos\varphi = \frac{I_{a1}}{I_1}. \tag{8.13}$$

8.12. Линейная нагрузка статора, А/м:

$$A_1 = I_1\frac{u_{\text{п}}}{\mathrm{a}_1 t_1}. \tag{8.14}$$

8.13. Линейная нагрузка ротора, А/м:

$$A_2 = A_1\frac{I_2''(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho_1^2}}{I_1}\cdot\frac{k_{\text{об1}}}{k_{\text{ск}}}. \tag{8.15}$$

8.14. Ток в стержне короткозамкнутого ротора, А:

$$I_{\text{ст}} = I_2''\frac{2m_1 W_1 k_{\text{об1}}}{\mathrm{Z}_2}(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho_1^2}\,. \tag{8.16}$$

8.15. Ток в короткозамыкающем кольце, А:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{ст}}}{k_{\text{пр.2}}}. \tag{8.17}$$

$k_{\text{пр.2}}$ – см. п. 5.2.2.

8.16. Ток в верхней части стержня в случае бутылочного паза, А:

$$I_{\text{ст.в}} = I_{\text{ст}} \frac{1}{1+\alpha}. \tag{8.18}$$

8.17. Ток в нижней части стержня в случае бутылочного паза, А:

$$I_{\text{ст.н}} = I_{\text{ст}} \frac{\alpha}{1+\alpha}. \tag{8.19}$$

8.18. Плотность тока в обмотке статора, в стержне короткозамкнутого ротора и в короткозамыкающем кольце, А/м^2:

$$J_1 = \frac{I_1}{n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} a}; \quad J_{\text{ст}} = \frac{I_{CT}}{q_{\text{ст}}}; \quad J_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{q_{\text{кл}}}. \tag{8.20}$$

8.19. Электрические потери в обмотке статора при нагрузке, Вт:

$$P_{\text{м}1} = m_1 I_1^2 r_1. \tag{8.21}$$

8.20. Электрические потери в обмотке ротора при нагрузке, Вт:

$$P_{\text{м}2} = m_1 I_2''^2 r_2''. \tag{8.22}$$

8.21. Суммарные потери в двигателе, Вт:

$$\sum P = P_{\text{м}1} + P_{\text{м}2} + \sum P_c + \sum P_{\text{мх}} + P_{\text{д}}. \tag{8.23}$$

8.22. Подводимая мощность двигателя, Вт:

$$P_1 = P_2 + \sum P. \tag{8.24}$$

8.23. Коэффициент полезного действия двигателя, %:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \cdot 100. \tag{8.25}$$

8.24. Проверка проведенного расчета:

$$P_1 = m_1 I_{a1} U_1; \quad P_2 = m_1 I_1 U_1 \eta \cos\varphi. \tag{8.26}$$

8.25. Расчет рабочих характеристик $(I_1, \eta, \cos\varphi, s) = f(P_2)$ производится для значений мощности kP_2, где k = 0,25; 0,5; 0,75; 1,25. Расчет ведется с п. 8.4 так же, как и для номинального режима (k = 1,0). Результаты расчета следует свести в таблицу.

9. НАЧАЛЬНЫЙ ПУСКОВОЙ МОМЕНТ И НАЧАЛЬНЫЙ ПУСКОВОЙ ТОК

Пусковые свойства электродвигателей оцениваются величиной пускового момента и пускового тока. Отношение начального пускового момента к номинальному $M_{п}/M_{н}$ должно быть не ниже, а отношение начального пускового тока – не выше значений, оговоренных в ГОСТ 19523-74.

Расчет величин пускового момента и пускового тока необходимо производить с учетом вытеснения тока в обмотках и насыщения потоков пазового рассеяния.

9.1. Активные сопротивления для ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами с учетом вытеснения тока находят по п. 5.2.1, где значения коэффициента $k_{в.т}$ находятся в следующем порядке.

Рассчитывается коэффициент ξ при соответствующих температурах:

$$\xi_{75°} = 66 h_{ст} \sqrt{s}; \quad \xi_{115°} = 64 h_{ст} \sqrt{s}, \tag{9.1}$$

где $h_{ст}$ – высота стержня клетки ротора, м:

при полузакрытых пазах $h_{ст} = h_{п2} - h_{щ}$ (рис. 4.1, *а*),

при закрытых пазах $h_{ст} = h_{п2} - h_2 - h_{щ}$ (рис. 4.1, *б*, *в*),

s – скольжение, в момент пуска s = 1,0.

Расчетная глубина проникновения тока в стержне, мм:

$$h_p = \frac{h_{ст}}{(1+\varphi)}, \tag{9.2}$$

где коэффициент $\varphi = f(\xi)$ определяют из рис. 9.1.

Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока, м:

$$b_p = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_p - r_1). \tag{9.3}$$

Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока, мм^2:

$$q_p = \frac{\pi}{2}r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_p}{2}\right)\left(h_p - r_1\right). \tag{9.4}$$

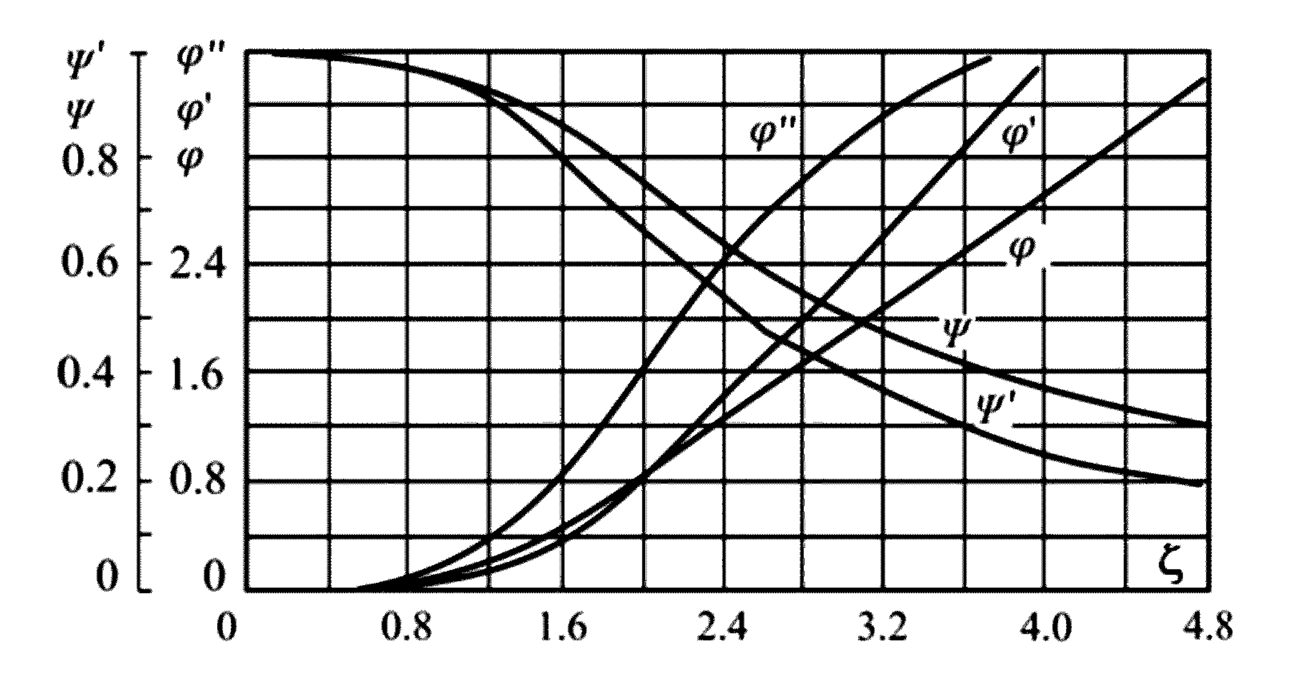


Рис. 9.1. Коэффициенты $\varphi = f(\xi)$ и $\psi = f(\xi)$

Коэффициент вытеснения тока:

$$k_{\text{в.т.}} = \frac{q_{\text{ст}}}{q_p}. \tag{9.5}$$

9.2. Активные сопротивления для ротора с бутылочными закрытыми пазами с учетом вытеснения тока рассчитываются по п. 5.2.6, где значение коэффициента $k_{\text{в.т.н}}$ находится в следующем порядке.

Рассчитываем глубину проникновения тока в нижнюю часть стержня $h_{p.\text{н}}$, м:

$$h_{p.\text{н}} = h_p - h , \qquad (9.6)$$

где h_p – см. п. 9.1.

Далее определяют ширину нижней части стержня $b_{p.\text{н}}$ и площадь поперечного сечения $q_{p.\text{н}}$, соответствующие глубине проникновения тока $h_{p.\text{н}}$, по п. 9.1 с заменой h_p, b_p и q_p соответственно на $h_{p.\text{н}}$ $b_{p.\text{н}}$ и $q_{p.\text{н}}$. Затем рассчитывают коэффициент $k_{\text{в.т.н}}$ с заменой $k_{\text{в.т}}$ $q_{\text{ст}}$ и q_p соответственно на $k_{\text{в.т.н}}$ $q_{\text{ст.н}}$ и $q_{p.\text{н}}$. Далее – по п. 9.1.

9.3. Индуктивное сопротивление рассеяния с учетом вытеснения тока ротора с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами определяется по п. 5.2.4 с подстановкой $\psi = f(\xi)$ из рис. 9.1, (ξ) из п. 9.1; для ротора с бутылочными пазами – по п. 5.2.7, где коэффициент, характеризующий уменьшение проводимости пазового рассеяния нижней клетки вследствие вытеснения тока, находится по формуле

$$\psi' = \frac{h_{\text{хн}}}{h_{\text{п}2} - h_2 - h}, \qquad (9.7)$$

где $h_{\text{хн}} = (h_{\text{п}2} - h_2)\psi - h$.

Коэффициент ψ определяют из рис. 9.1 в зависимости от значения ξ, рассчитанного в п. 9.1.

При определении коэффициента α с учетом вытеснения тока следует вместо $q_{\text{ст.н}}$ подставить $q_{p.\text{н}}$, где $q_{p.\text{н}}$ – площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока – следует определять по п. 9.1 с заменой h_p, b_p и q_p соответственно на $h_{\text{хн}}$, $b_{\text{хн}}$ и $q_{p\text{н}}$.

9.4. Значения сопротивлений r_1', r_2'', x_1', x_2'' определяют согласно п. 8.1, сопротивлений r_k, x_k, Z_k – согласно п. 8.2.

9.5. Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения:

паз трапецеидальный полузакрытый (рис. 5.1, *а*):

$$\lambda_{\text{п1пер}} = \left(\frac{3h_k}{b_2 + 2b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} \right) k'_{\beta}; \tag{9.8}$$

паз прямоугольный полуоткрытый (рис. 5.1, *б*):

$$\lambda_{\text{п1пер}} = \left(\frac{3h_k}{b_{\text{п1}} + 2b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} \right) k'_{\beta}; \tag{9.9}$$

паз прямоугольный открытый (рис. 5.1, *в*):

$$\lambda_{\text{п1пер}} = \frac{h_k + h_{\text{щ}}}{b_{\text{п1}}} k'_{\beta}. \tag{9.10}$$

Здесь k'_{β} – коэффициент, определяемый по рис. 5.2.

9.6. Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения:

$$\lambda_{\text{1пер}} = \lambda_{\text{п1пер}} + \lambda_{\text{Д1}}. \tag{9.11}$$

9.7. Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния ротора с овальным полузакрытым пазом (рис. 4.1, *а*), зависящая от насыщения:

$$\lambda_{\text{п2пер}} = \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}}. \tag{9.12}$$

Паз овальный закрытый (рис. 4.1, *б*) и бутылочный закрытый (рис. 4.1, *в*):

$$\lambda_{\text{п2пер}} = \lambda_{HB\text{пер}} = 1{,}12 \frac{h_2 \cdot 10^6}{I_2}, \tag{9.13}$$

где I_2 – значение тока стержня ротора (п. 5.2.4).

9.8. Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения:

$$\lambda_{2пер} = \lambda_{п2пер} + \lambda_{Д2}. \tag{9.14}$$

9.9. Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения, Ом:

для двигателя с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами ротора:

$$x_{пер} = x_1' \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x_2'' \frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_2}; \tag{9.15}$$

для двигателя с бутылочными закрытыми пазами ротора:

$$x_{пер} = x_1' \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x_о'' \frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_{2о}}. \tag{9.16}$$

Здесь λ_1, λ_2, $\lambda_{2о}$ – см. п. 5.1.2, 5.2.4, 5.2.7;

x_1', x_2'' – см. п. 8.1;

$x_о'' = x_о'(1+\tau_1)^2$, $x_о'$ – см. п. 5.2.7.

9.10. Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения, Ом:

для двигателя с овальными полузакрытыми и закрытыми пазами ротора:

$$x_{пост} = x_1' \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x_2'' \frac{\lambda_2 - \lambda_{2пер}}{\lambda_2}; \tag{9.17}$$

для двигателя с бутылочными закрытыми пазами:

$$x_{пост} = x_1' \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x_о'' \frac{\lambda_{2о} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{2о}} + x_н'' \left(\frac{\alpha}{1+\alpha}\right)^2, \tag{9.18}$$

где $x_н'' = x_н'(1+\tau_1)^2$, $x_н'$ – см. п. 5.2.7;

α – см. п. 9.3, п. 5.2.7.

9.11. Расчетный ток ротора при пуске, А:

$$I''_{п2} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер})^2}} -$$

$$- \frac{1{,}24 \cdot 10^6 \delta \cdot a_1 x_{пер} (x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер})}{u_п \left[r_k^2 + (x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер})^2 \right]}, \qquad (9.19)$$

где δ, a_1, $u_п$ – см. п. 2.8 и 3.1.6.

В случае закрытых овальных и бутылочных пазов ротора вместо коэффициента 0,0825 следует подставлять 0,25.

9.12. Расчетные параметры схемы замещения при пуске с учетом вытеснения тока в стержнях ротора и насыщения путей потоков рассеяния, Ом:

$$Z_k = \frac{U_1}{I''_{п2}}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}. \qquad (9.20)$$

9.13. Активная составляющая тока статора при пуске, А:

$$I_{п.а1} = I_{c.a} + I''_{п2} \left(\frac{r_k}{Z_k} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_k} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \qquad (9.21)$$

9.14. Реактивная составляющая тока статора при пуске, А:

$$I_{п.р1} = I_{c.p} + I''_{п2} \left(\frac{x_k}{Z_k} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{r_k}{Z_k} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right). \qquad (9.22)$$

9.15. Фазный ток статора при пуске, А:

$$I_{п1} = \sqrt{I_{п.а1}^2 + I_{п.р1}^2}. \qquad (9.23)$$

9.16. Кратность пускового тока: $I_{п1}/I_{1н}$.

9.17. Кратность пускового момента:

$$\frac{M_п}{M_н} = \frac{m_1 I''^2_{п2} r''_2 (1 - s_н)}{P_2}, \quad (9.24)$$

где P_2 – выражено в ваттах.

10. МАКСИМАЛЬНЫЙ МОМЕНТ

Отношение максимального момента к номинальному $M_{max}/M_н$ не должно быть менее значений, указанных в ГОСТ 19523-74.

Расчет максимального момента следует производить с учетом насыщения путей потоков рассеяния, так как при максимальном моменте ток статора и ротора в 2–3 раза больше, чем при номинальном. Вытеснением тока в стержне ротора можно пренебречь, так как частота f_2 в этом режиме мала.

10.1. Расчетный ток ротора, А:

$$I''_{м2} = \frac{U_1}{\sqrt{2\left[r_1'^2 + \left(x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер}\right)^2 + r_1'\left(x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер}\right)\right]}} -$$

$$- \frac{1{,}24 \cdot 10^3 \delta \cdot a_1 \left[r_1' + 2\left(x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер}\right)\right] x_{пер}}{2u_п \left[r_1'^2 + \left(x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер}\right)^2 + r_1'\left(x_{пост} + 0{,}0825 x_{пер}\right)\right]}. \quad (10.1)$$

В случае закрытых овальных и бутылочных пазов ротора вместо коэффициента 0,0825 следует подставлять 0,25.

Расчет индуктивных сопротивлений обмоток $x_{пост}$ проводится по п. 9.10 без учета вытеснения тока в стержне, т. е. при $\alpha = q_{ст.н}/q_{ст.в}$; значение $x_{пер}$ берется из п. 9.9.

10.2. Сопротивления схемы замещения при максимальном моменте, Ом:

$$Z_{\text{м}} = \frac{U_1}{I''_{\text{м}2}}; \quad x_k = \sqrt{Z_{\infty}^2 - r_1'^2}; \quad R_{\text{м}} = Z_{\infty} + r_1', \tag{10.2}$$

где сопротивление

$$Z_{\infty} = \frac{\sqrt{r_1'^2 + 2Z_{\text{м}}^2 - r_1^2}}{2}. \tag{10.3}$$

10.3. Активная составляющая тока статора, А:

$$I_{\text{м.а}1} = I_{\text{с.а}} + I''_{\text{м}2}\left(\frac{R_{\text{м}}}{Z_{\text{м}}} \cdot \frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_{\text{м}}} \cdot \frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right). \tag{10.4}$$

10.4. Реактивная составляющая тока статора, А:

$$I_{\text{м.р}1} = I_{c.p} + I''_{\text{м}2}\left(\frac{x_k}{Z_{м}} \cdot \frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} - \frac{R_{\text{м}}}{Z_{\text{м}}} \cdot \frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right). \tag{10.5}$$

10.5. Ток фазы статора, А:

$$I_{\text{м}1} = \sqrt{I_{\text{м.а}1}^2 + I_{\text{м.р}1}^2}. \tag{10.6}$$

10.6. Кратность максимального момента:

$$\frac{M_{\max}}{M_{\text{н}}} = \frac{m_1 U_1^2 (1 - s_{\text{н}})}{2 R_{\text{м}} P_2}. \tag{10.7}$$

10.7. Скольжение при максимальном моменте:

$$s_{\text{м}} = \frac{r_2''}{Z_{\infty}}. \tag{10.8}$$

11. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ДВИГАТЕЛЯ

В поверочном расчете асинхронного двигателя тепловой расчет проводится приближенным методом. В нем используются усредненные значения коэффициентов теплопроводности изоляции и теплоотдачи с поверхности. Расчет нагрева проводят используя значения потерь, полученных для номинального режима.

11.1. Электрические потери в обмотке статора разделяют на две части – потери в пазовой части $P'_{э,п1}$ и потери в лобовых частях катушек $P'_{э,л1}$:

$$P'_{э,п1} = k_{\rho} P_{м1} \frac{2l_1}{l_{ср.1}}, \qquad P'_{э,л1} = k_{\rho} P_{м1} \frac{2l_{л1}}{l_{ср1}}. \qquad (11.1)$$

Здесь k_{ρ} – коэффициент увеличения потерь.

Таблица 11.1

Класс изоляции	B	F	H
k_{ρ}	1,15	1,07	1,45

11.2. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины, °С:

$$\Delta\theta_{пов} = K \frac{P'_{э,п1} + \sum P_{ст}}{\pi D_1 l_{\delta} \alpha_1}, \qquad (11.2)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности (рис. 11.1 и 11.2);

K – коэффициент, учитывающий передачу части потерь сердечника статора через станину непосредственно в окружающую среду (табл. 11.2).

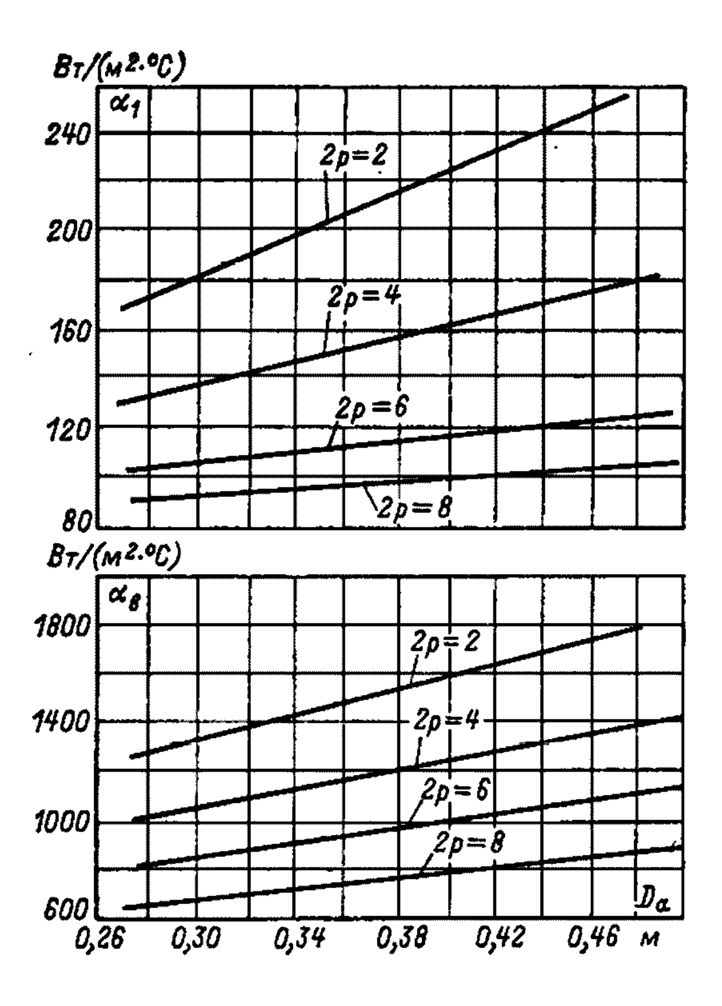


Рис. 11.1. Средние значения коэффициентов теплоотдачи α_1 с поверхности и подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP23 при h = 160…250 мм

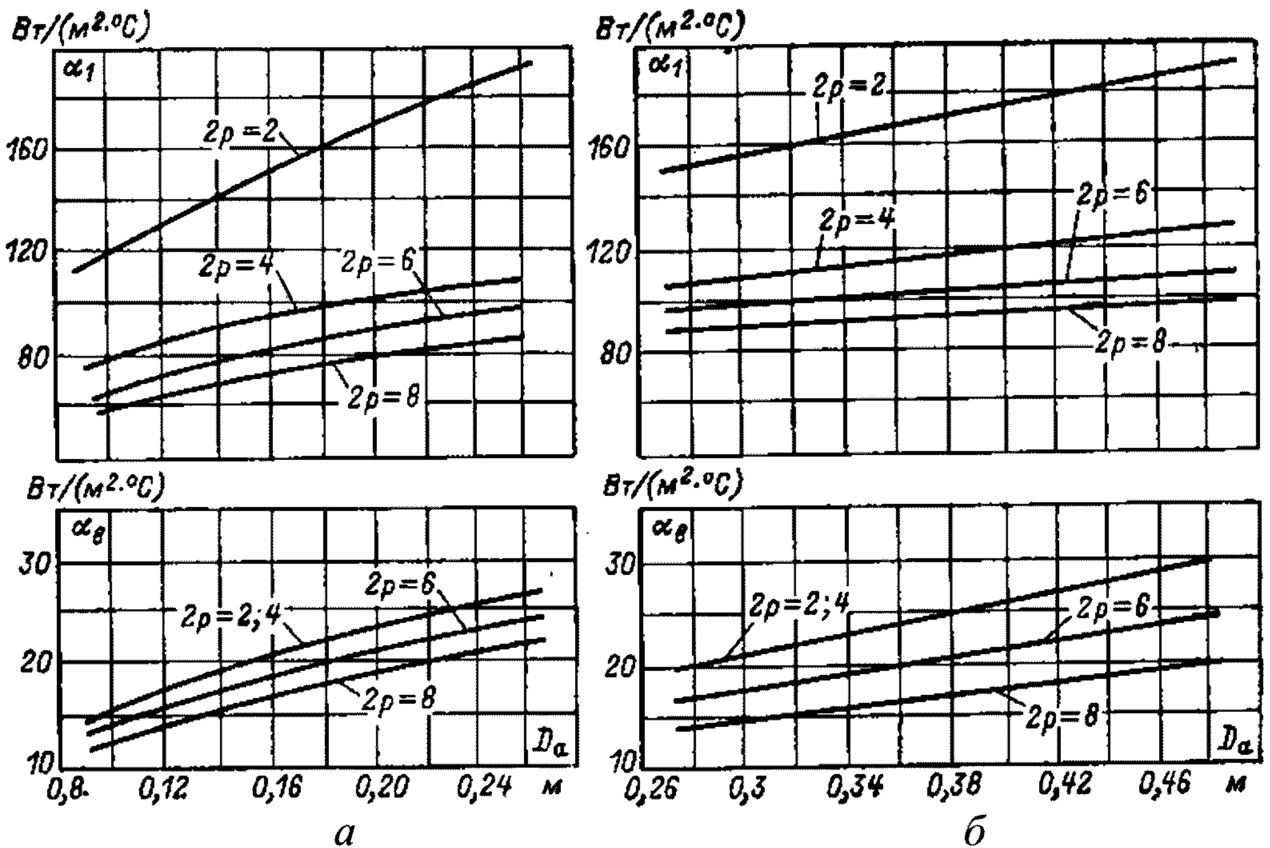


Рис. 11.2. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха $\alpha_в$ для асинхронных двигателей исполнения IP44:

а – при h < 160 мм; *б* – при h = 160…250 мм

Таблица 11.2

Средние значения коэффициента *K* для асинхронных двигателей серии 4А

Исполнение двигателя по способу защиты	Число полюсов двигателя 2p					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

11.3. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора, °С:

$$\Delta\theta_{\text{из,п}1} = \frac{P'_{\text{э,п}1}}{Z_1 \Pi_{\text{п}1} t_1} \left(\frac{b_{\text{из}1}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{экв}}} \right), \tag{11.3}$$

где $\Pi_{\text{п}1}$ – периметр поперечного сечения паза статора:

для полузакрытых пазов (см. рис. 3.1, *а*):

$$\Pi_{\text{п}1} = 2h_{\text{п}1} + b_1 + b_2, \tag{11.4}$$

для прямоугольных пазов (см. рис. 3.1, *б*, *в*):

$$\Pi_{\text{п}1} = 2(h_{\text{п}1} + b_{\text{п}1}); \tag{11.5}$$

$b_{\text{из}1}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу, м:

для всыпной обмотки $b_{\text{из}1} = (0,3...0,9) \cdot 10^{-3}$,

для обмотки из прямоугольного провода $b_{\text{из}1} = (b_{\text{п}} - n_{\text{эл}} b) \cdot 0,5$,

где $n_{\text{эл}}$ и b – число и ширина неизолированных элементарных проводников, расположенных в одном слое по ширине паза;

$\lambda_{\text{экв}} = 0,16$ Вт/(м·°С) – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции;

$\lambda'_{\text{экв}}$ – среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции всыпной обмотки по рис. 11.3, для обмоток из прямоугольного провода $\lambda'_{\text{экв}} \to \infty$.

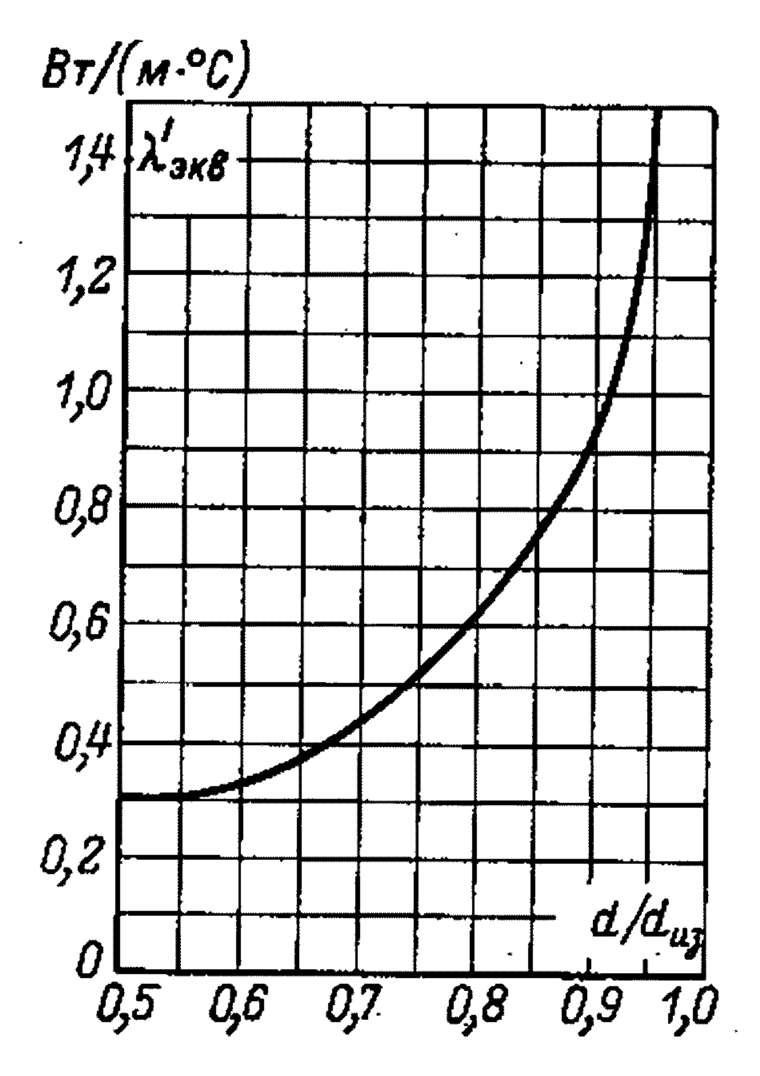


Рис. 11.3. Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции катушек всыпной обмотки из эмалированного провода

11.4. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей, °С:

$$\Delta\theta_{из,л1} = \frac{P'_{э,л1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} \left(\frac{b_{из,л1}}{\lambda'_{экв}} + \frac{h_{п1}}{12\lambda'_{экв}} \right), \qquad (11.6)$$

где $\Pi_{л1}$ – периметр поверхности охлаждения лобовой части одной катушки $\Pi_{л1} \approx \Pi_{п1}$;

$b_{из,л1} = 0,2...0,5$ мм – односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки.

11.5. Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины, °C:

$$\Delta\theta_{\text{пов.л}1} = \frac{KP'_{\text{э,л}1}}{2\pi D_1 l_{\text{в}1}\alpha_1}. \tag{11.7}$$

11.6. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины, °C:

$$\Delta\theta'_1 = \frac{\left(\Delta\theta_{\text{пов}} + \Delta\theta_{\text{из,п}1}\right)2l_\delta + \left(\Delta\theta_{\text{из,л}1} + \Delta\theta_{\text{пов.л}1}\right)2l_{\text{л}1}}{l_{\text{ср.}1}}. \tag{11.8}$$

11.7. Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\Delta\theta_{\text{в}} = \frac{\sum P'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}}\alpha_{\text{в}}}, \tag{11.9}$$

где $\sum P'_{\text{в}}$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, Вт; за исключением доли потерь в статоре, передаваемой через наружную поверхность сердечника:

$$\sum P'_{\text{в}} = \sum P - \left[(1-K)P_{\text{м}1}k_\theta \frac{2l_1}{l_{\text{ср}1}} + \sum P_c\right], \tag{11.10}$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м^2·°C), учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины (рис. 11.1 и 11.2);

$S_{\text{кор}}$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, м^2:

$$S_{\text{кор}} = \left(\pi D_a + 8\Pi_{\text{р}}\right)\left(l_1 + 2l_{\text{выл.}1}\right), \tag{11.11}$$

где $\Pi_{\text{р}}$ – условный периметр поперечного сечения ребер станины (рис. 11.4).

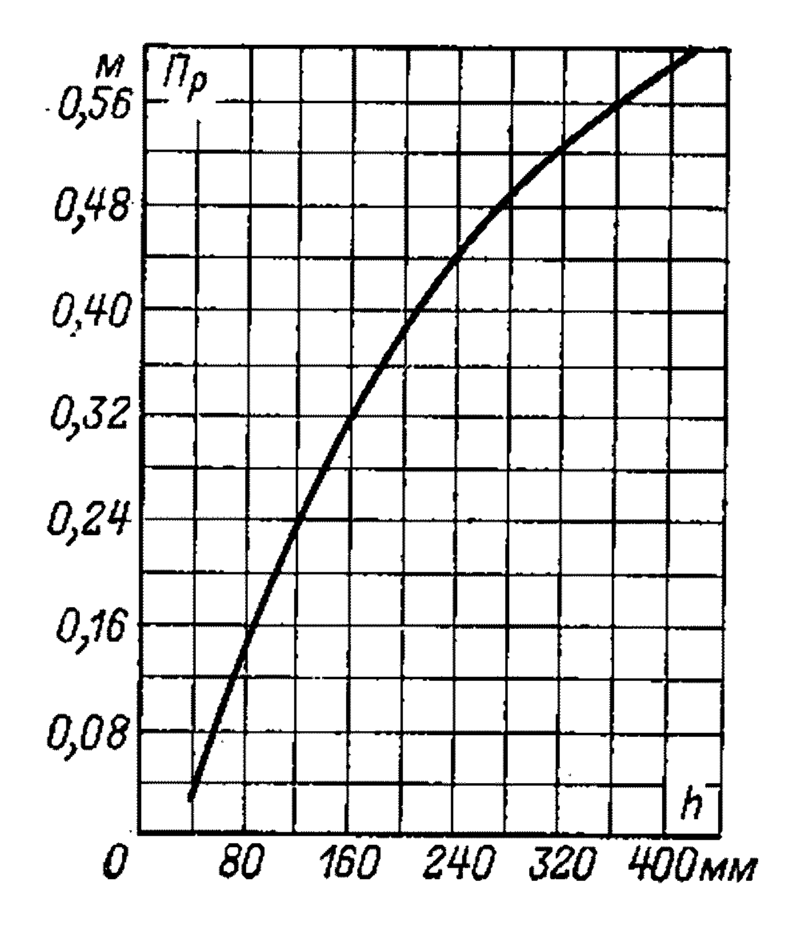


Рис. 11.4. Средние значения периметра поперечного сечения ребер асинхронных двигателей серии 4А

11.8. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, °С:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_1' + \Delta\theta_в .$$

ПРИМЕР ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

1. Техническое задание

Сделать поверочный расчет трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Тип двигателя – 4А160М4У3.

Номинальная мощность – 18,5 кВт.

Синхронная частота вращения – 1500 об/мин.

Исполнение по способу защиты – IP44.

Номинальное напряжение – 220/380 В.

2. Выбор главных размеров, расчет и выбор размеров магнитопровода

2.1. Высота оси вращения h (табл. 1.1) $h = 160$ мм.

2.2. Наружный диаметр сердечника статора D_a (табл. 2.1) $D_a = 0,272$ м.

2.3. Внутренний диаметр статора по формуле (2.1), м:

$$D_1 = k_D D_a = 0,68 \cdot 0,27 = 0,185,$$

где k_D – по табл. 2.2 $k_D = 0,64...0,68$.

2.4. Расчетная мощность по формуле (2.2), Вт:

$$P' = \frac{P_2 \cdot k_e}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{18\ 500 \cdot 0,97}{0,89 \cdot 0,89} = 22\ 650,$$

где η и $\cos\varphi$ определяются по рис. 2.1 и 2.2, k_e – по рис. 2.3:

$$\eta = 0,89,\ \cos\varphi = 0,89,\ k_e = 0,97.$$

2.5. Полюсное деление по формуле (2.3), м:

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,185}{4} = 0,145.$$

2.6. Электромагнитные нагрузки A и B_δ по рис. 2.4 и 2.5:

$$A = 300 \cdot 10^2 \text{ А/м};\ B_\delta = 0,76 \text{ Тл}.$$

2.7. Расчетная длина воздушного зазора по формуле (2.4), м:

$$l'_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D_1^2 \cdot \Omega \cdot k_{об1} \cdot A \cdot B_\delta} =$$

$$= \frac{22\ 650}{1,1 \cdot 0,185^2 \cdot 157,08 \cdot 0,95 \cdot 300 \cdot 10^2 \cdot 0,76} = 0,177,$$

где $\Omega = 2 \cdot \pi \cdot n_1 / 60 = 2 \cdot \pi \cdot 1500/60 = 157,08\ \text{с}^{-1}$;

$k_B = 1,11$ – коэффициент формы поля;

$k_{об1}$ – обмоточный коэффициент, предварительно $k_{об1} = 0,95$.

2.8. Отношение $\lambda = l'_\delta / \tau$ находится в рекомендуемых пределах по рис. 2.6:

$$\lambda = \frac{l'_\delta}{\tau} = \frac{0,177}{0,145} = 1,22.$$

2.9. Воздушный зазор между статором и ротором δ.

Обычно величина δ определяется по эмпирическим формулам. Для серии 4А выбор воздушного зазора рекомендуется проводить по установленным практикой электромашиностроения средним значениям δ по рис. 2.7. Выбранные значения δ округляются до 0,05 мм при $\delta \le 0,5$ мм и до 0,1 мм при $\delta > 0,5$ мм:

$$\delta = 0,5 \text{ мм}.$$

2.10. Наружный диаметр сердечника ротора по формуле (2.5), м:

$$D_2 = D_1 - 2 \cdot \delta \cdot 10^{-3} = 0,185 - 2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 0,184.$$

2.11. Внутренний диаметр листов ротора, по формуле (2.6), м:

$$D_{2B} = k_b \cdot D_2 = 0,23 \cdot 0,184 = 0,042 \text{ м},$$

где k_b берется из табл. 2.3: $k_b = 0,23$.

3. Обмотка статора

3.1. Тип и число витков обмотки.

Обмотки, нашедшие наибольшее применение в асинхронных машинах серии 4А, в зависимости от номинального напряжения и высоты оси вращения приведены в табл. 3.1.

Тип обмотки и формы пазов статора

U, В	h, мм	$2p$	Тип обмотки	Пазы (формы)
≤ 660	71…160	2, 4, 6, 8	Однослойная, всыпная, концентрическая	Трапецеидальные полузакрытые

3.1.1. Числа пазов статора и ротора зависят от чисел полюсов и от диаметра сердечника. От сочетания чисел пазов статора и короткозамкнутого ротора зависят добавочные потери, величина провалов в характеристике пускового момента, уровень шума и вибрации двигателя. Практикой установлены наиболее благоприятные сочетания чисел Z_1/Z_2, которые приведены в табл. 3.2:

$$Z_1/Z_2 = 48/38.$$

3.1.2. Число пазов на полюс и фазу статора, по формуле (3.1):

$$q_1 = \frac{Z_1}{2mp} = \frac{48}{2 \cdot 3 \cdot 2} = 4.$$

3.1.3. Обмоточный коэффициент, по формулам (3.2)–(3.4):

$$k_{об1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0{,}958 \cdot 1 = 0{,}958,$$

где k_{p1} – коэффициент распределения обмотки:

$$k_{p1} = \frac{0{,}5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{30°}{q_1}\right)} = \frac{0{,}5}{4 \cdot \sin\left(\frac{30°}{4}\right)} = 0{,}958;$$

k_{y1} – коэффициент укорочения обмотки:

$$k_{у1} = \sin(\beta \cdot 90°) = 1.$$

Однослойная обмотка с целым q_1 выполняется без укорочения с диаметральным шагом по пазам $(\beta = 1)$:

$$y_{п1} = \beta \cdot \frac{Z_1}{2p} = 1\frac{48}{2 \cdot 2} = 12.$$

3.1.4. Предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре по формуле (3.6), Вб:

$$\Phi_{предв} = B_\delta \cdot D_1 \cdot l'_\delta \cdot \frac{1}{p} = 0{,}76 \cdot 0{,}185 \cdot 0{,}177 \cdot \frac{1}{2} = 12{,}4 \cdot 10^{-3}.$$

3.1.5. Предварительное число витков в обмотке фазы по формуле (3.7):

$$W_{1\text{предв}} = \frac{k_e \cdot U_1}{4{,}44 \cdot k_{\text{об}1} \cdot f_1 \cdot \Phi_{\text{предв}}} = \frac{0{,}97 \cdot 220}{4{,}44 \cdot 0{,}958 \cdot 50 \cdot 12{,}4 \cdot 10^{-3}} = 80{,}9 \approx 81,$$

где $k_e = 0{,}97,$ определяется по рис. 2.3.

3.1.6. Предварительное число эффективных проводников в пазу по формуле (3.8):

$$u_{\text{предв}} = W_{1\text{предв}} \cdot \frac{a_1}{p \cdot q_1} = 81 \cdot \frac{2}{2 \cdot 4} = 20,$$

где $a_1 = 2$ – число параллельных ветвей фазы обмотки статора.

3.1.7. Уточненное число витков обмотки фазы статора по формуле (3.9):

$$W_1 = \frac{u_{\text{п}} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{20 \cdot 2 \cdot 4}{2} = 80 \text{ витков},$$

где $u_{\text{п}}$ – принятое целое число эффективных проводников в пазу.

3.1.8. Уточненная расчетная длина сердечника статора по формуле (3.10), м:

$$l_\delta = l'_\delta \cdot W_{1\text{предв}} / W_1 = 0{,}177 \cdot 81/80 = 0{,}18.$$

Значение l_δ при длине сердечника менее 100 мм округляют до ближайшего целого числа, мм. При большей длине – до 5 или 10 мм.

$$l_\delta = 0{,}18.$$

3.1.9. Уточненное значение магнитного потока по формуле (3.11), Вб:

$$\Phi = \Phi_{\text{предв}} \cdot W_{1\text{предв}} / W_1 = 12{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 81/80 = 12{,}6 \cdot 10^{-3}.$$

3.1.10. Уточненное значение индукции в воздушном зазоре по формуле (3.12), Тл:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D_1 \cdot l_\delta} = \frac{12{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 2}{0{,}185 \cdot 0{,}18} = 0{,}76 .$$

3.1.11. Номинальный фазный ток по формуле (3.13), А:

$$I_{1\text{н}} = \frac{P_1}{3 \cdot U_1 \cos\varphi} = \frac{20\ 800}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}89} = 35{,}4 ,$$

где $P_1 = P_2/\eta = 18\ 500/0{,}89 = 20\ 800$.

3.1.12. Линейная нагрузка статора по формуле (3.14), А/м:

$$A_1 = \frac{u_\text{п} \cdot Z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a_1} = \frac{20 \cdot 48 \cdot 35{,}4}{\pi \cdot 0{,}185 \cdot 2} = 29\ 250 .$$

3.1.13. Предварительная высота спинки статора по формуле (3.15), м:

$$h_{c1} = \frac{\Phi}{2 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot B_{c1}} = \frac{12{,}6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}97 \cdot 1{,}45} = 24{,}9 \cdot 10^{-3} ,$$

где k_c – коэффициент заполнения сердечника статора сталью $k_c \approx 0{,}95...0{,}97$;

B_{c1} – магнитная индукция в спинке статора, допустимые значения B_{c1} приведены в табл. 3.3:

$$B_{c1} = 1{,}45 \text{ Тл} .$$

3.1.14. Высота паза статора по формуле (3.16), м:

$$h_{\text{п}1} = \frac{(D_a - D_1)}{2} - h_{c1} = \frac{(0{,}275 - 0{,}185)}{2} - 0{,}0249 = 20 \cdot 10^{-3} .$$

3.1.15. Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора по формуле (3.17), м:

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 0{,}185}{48} = 12{,}1 \cdot 10^{-3}.$$

3.2. Размеры трапецеидальных полузакрытых пазов и круглых проводников обмотки (см. рис. 3.1, *а*).

3.2.1. Расчетная ширина зубца с равновеликим сечением по формуле (3.18), м:

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_c \cdot B_{z1}} = \frac{12{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}76}{0{,}97 \cdot 1{,}75} = 5{,}4 \cdot 10^{-3}.$$

Допустимые значения магнитной индукции в зубцах B_{z1} приведены в табл. 3.4.

3.2.2. Размеры трапецеидального паза при угле $\beta = 45°$ (для двигателей с высотами вращения $h = 50 \ldots 250$ мм):

большая ширина паза по формуле (3.19), м:

$$b_1 = \frac{\pi(D_1 + 2h_{\text{п}1})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{3{,}14(0{,}185 + 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3})}{48} - 5{,}4 \cdot 10^{-3} = 9{,}3 \cdot 10^{-3};$$

меньшая ширина паза по формуле (3.20), м:

$$b_2 = \frac{\left[\pi\left(D_1 + 2h_{\text{щ}} - b_{\text{щ}}\right) - Z_1 b_{z1}\right]}{Z_1 - \pi} =$$

$$= \frac{3{,}14(0{,}185 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 3{,}7 \cdot 10^{-3}) - 48 \cdot 5{,}4 \cdot 10^{-3}}{48 - 3{,}14} = 7 \cdot 10^{-3},$$

где $b_{\text{щ}}$ – ширина шлица принимается из табл. 3.5;

$h_{\text{щ}}$ – высота шлица, для двигателей с высотами вращения 160…315 мм; $h_{\text{щ}} = 1{,}0 \cdot 10^{-3}$ м.

Площадь поперечного сечения паза по формуле (3.21), м^2:

$$Q'_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2}\left(h_{п1} - h_{щ} - \frac{b_2 - b_{щ}}{2}\right) =$$

$$= \frac{(9{,}3 + 7) \cdot 10^{-3}}{2}\left(20 - 1 - \frac{7 - 3{,}7}{2}\right) \cdot 10^{-3} = 141 \cdot 10^{-6}.$$

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой, по формуле (3.22), м^2:

$$Q''_{п1} = Q'_{п1} - Q_{и} - Q_{пр} = (141 - 14) \cdot 10^{-6} = 127 \cdot 10^{-6},$$

где $Q_{пр} = 0$ – площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу, на дне паза и под клином;

$Q_{и}$ – площадь поперечного сечения корпусной изоляции по формуле (3.23), м^2:

$$Q_{и} = b_{и}(2h_{п1} + b_1 + b_2) = 0{,}25 \cdot 10^{-3}(2 \cdot 20 + 9{,}3 + 7) \cdot 10^{-3} = 14 \cdot 10^{-6};$$

$b_{и}$ – односторонняя толщина корпусной изоляции, м:

$$b_{и} = 0{,}25 \cdot 10^{-3} \text{ при } h = 90 \ldots 160 \text{ мм}.$$

3.2.3. Размеры проводников.

Для обмоток статоров с полузакрытыми пазами рекомендуется применение следующих марок проводов круглого поперечного сечения: ПЭТВ или ПЭТВМ при классе нагревостойкости B и ПЭТ-155 или ПЭТМ при классе нагревостойкости F.

Допустимый диаметр изолированного проводника по формуле (3.26), м:

$$d' = \sqrt{\frac{k_{п} Q''_{п1}}{n_{эл} u_{п}}} = \sqrt{\frac{0{,}72 \cdot 127 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 20}} = 1{,}52 \cdot 10^{-3},$$

где $k_п$ – коэффициент заполнения, $k_п = 0,7...0,75$.

$n_{эл}$ – число элементарных проводников в эффективном проводнике.

Так как диаметр d' превышает 1,71 мм, разбиваем эффективный проводник на 2 элементарных.

Далее подбирается по табл. П-1 (прил. 1) ближайший стандартный диаметр голого проводника d = 1,4 мм и изолированного d' = 1,485 мм, площадь сечения $q_{эл}$ = 1,539 мм^2. После этого уточняется коэффициент заполнения паза по формуле (3.27):

$$k_п = \frac{n_{эл} u_п (d')^2}{Q''_{п1}} = \frac{2 \cdot 20 \cdot (1,485)^2}{127 \cdot 10^{-6}} = 0,69 .$$

3.2.4. Плотность тока в обмотке статора по формуле (3.28), А/м^2:

$$J_1 = \frac{I_1}{n_{эл} q_{эл} a_1} = \frac{35,4}{2 \cdot 1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 5,75 \cdot 10^6 ,$$

где $q_{эл}$ – площадь элементарного проводника.

3.2.5. Тепловая нагрузка обмотки статора, $A_1 J_1$, А^2/м^3.

Значения тепловой нагрузки не должны превышать средние допустимые, приведенные на рис. 3.2.

$$A_1 J_1 = 29\ 250 \cdot 5,75 \cdot 10^6 = 168 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3 .$$

3.2.6. Размеры обмотки.

Средняя ширина катушки обмотки статора по формуле (3.29), м:

$$b_{ср} = t_{ср} y_{п1} = 0,0134 \cdot 12 = 0,16 ,$$

где $y_{п1}$ – шаг по пазам обмотки статора;

$t_{ср}$ – среднее зубцовое деление статора по формуле (3.30), м:

$$t_{ср} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{п1})}{Z_1} = \frac{3,14 \cdot (0,185 + 0,02)}{48} = 0,0134 .$$

Средняя длина одной лобовой части катушки по формуле (3.31), м:

$$l_{\text{л}1} = (1{,}16 + 0{,}14p) \cdot b_{\text{ср}} + 0{,}015 = (1{,}16 + 0{,}14 \cdot 2) \cdot 0{,}16 + 0{,}015 = 0{,}245\ .$$

Средняя длина витка обмотки по формуле (3.32), м:

$$l_{\text{ср}1} = 2 \cdot (l_{\delta} + l_{\text{л}1}) = 2 \cdot (0{,}18 + 0{,}245) = 0{,}85\ .$$

Длина вылета лобовой части обмотки по формуле (3.34), м:

$$l_{\text{в}1} = (0{,}12 + 0{,}15p) \cdot b_{\text{ср}} + 0{,}01 = (0{,}12 + 0{,}15 \cdot 2) \cdot 0{,}16 + 0{,}01 = 0{,}077\ .$$

4. Обмотка короткозамкнутого ротора

Обмотка короткозамкнутых роторов двигателей с высотами оси вращения 50…355 мм выполняется заливкой пазов спрессованных сердечников алюминием марки А5 (ГОСТ 11069-74).

В двигателях с h = 160…225 мм, р = 2…8 – выполняются овальные закрытые пазы.

Зубцы ротора двигателей с овальными пазами выполняются с равновеликим поперечным сечением по высоте.

4.1. Зубцовое деление по наружному диаметру ротора по формуле (4.1), м:

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0{,}184}{38} = 0{,}0152\ .$$

4.2. Ширина зубца в расчетном сечении по формуле (4.2), м:

$$b_{z2} = \frac{t_2 B_{\delta}}{B_{z2} k_c} = \frac{0{,}0152 \cdot 0{,}76}{1{,}8 \cdot 0{,}97} = 0{,}0066\ ,$$

где k_c = 0,95…0,97.

Магнитная индукция в расчетном сечении зубца принимается из табл. 4.1.

4.3. Большой радиус по формуле (4.3), м:

$$r_1 = \frac{\pi\left(D_2 - 2h_{\text{щ}} - 2h_2\right) - Z_2 b_{z2}}{2\left(Z_2 + \pi\right)} =$$

$$= \frac{3{,}14(0{,}184 - 2\cdot 0{,}7\cdot 10^{-3} - 2\cdot 0{,}3\cdot 10^{-3}) - 38\cdot 0{,}0066}{2(38 + 3{,}14)} = 0{,}0039,$$

для овального закрытого паза $h_{\text{щ}} = 0{,}7\cdot 10^{-3}$ м, $h_2 = 0{,}3\cdot 10^{-3}$ м.

4.4. Высота паза $h_{\text{п}2}$ принимается из рис. 4.2: $h_{\text{п}2} = 0{,}022$.

4.5. Магнитная индукция в спинке ротора по формуле (4.4), Тл:

$$B_{c2} = \frac{\Phi}{2k_c l_\delta h_{c2}} = \frac{12{,}6\cdot 10^{-3}}{2\cdot 0{,}97\cdot 0{,}18\cdot 0{,}044} = 0{,}82\,,$$

где h_{c2} – расчетная высота спинки ротора по формуле (4.5), м:

$$h_{c2} = \frac{2+p}{3{,}2p}\left(\frac{D_2}{2} - h_{\text{п}2}\right) = \frac{2+2}{3{,}2\cdot 2}\left(\frac{0{,}184}{2} - 0{,}022\right) = 0{,}044\,.$$

4.6. Меньший радиус по формуле (4.6), м:

$$r_2 = \frac{\pi\left(D_2 - 2h_{\text{п}2}\right) - Z_2 b_{z2}}{2\left(Z_2 - \pi\right)} =$$

$$= \frac{3{,}14(0{,}184 - 2\cdot 0{,}022) - 38\cdot 0{,}0066}{2(38 - 3{,}14)} = 2{,}72\cdot 10^{-3}.$$

4.7. Расстояние между центрами радиусов по формуле (4.7), м:

$$h_1 = h_{\text{п}2} - h_{\text{щ}} - r_1 - r_2 = (22 - 0{,}7 - 3{,}9 - 2{,}72)\cdot 10^{-3} = 14{,}7\cdot 10^{-3}\,.$$

4.8. Площадь поперечного сечения паза, равная площади поперечного сечения стержня обмотки по формуле (4.8), м²:

$$Q_{п2} = q_{ст} = \frac{\pi}{2}\left(r_1^2 + r_2^2\right) + (r_1 + r_2)h_1 =$$

$$= \frac{3{,}14}{2}(3{,}9^2 + 2{,}72^2)\cdot 10^{-6} + (3{,}9 + 2{,}72)\cdot 14{,}7\cdot 10^{-6} = 133\cdot 10^{-6}.$$

4.9. Размеры короткозамыкающего кольца.

4.9.1. Поперечное сечение литой клетки (рис. 4.3) по формуле (4.15), м²:

$$q_{кл} = \frac{(0{,}35...0{,}45)\cdot Z_2 \cdot q_{ст}}{2p} = \frac{0{,}35\cdot 38\cdot 89\cdot 10^{-6}}{4} = 295\cdot 10^{-6}.$$

4.9.2. Высота кольца литой клетки по формуле (4.16), м:

$$h_{кл} = (1{,}2...1{,}25)\cdot h_{п2} = 1{,}25\cdot 22\cdot 10^{-3} = 27\cdot 10^{-3}.$$

4.9.3. Длина кольца по формуле (4.17), м:

$$l_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{295\cdot 10^{-6}}{27\cdot 10^{-3}} = 11\cdot 10^{-3}.$$

4.9.4. Средний диаметр кольца литой клетки по формуле (4.18), м:

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 0{,}184 - 27\cdot 10^{-3} = 157\cdot 10^{-3}.$$

5. Расчетные параметры двигателя для рабочего режима

5.1. Параметры обмотки статора.

5.1.1. Активное сопротивление фазы обмотки статора по формуле (5.1), Ом:

$$r_1 = \rho\cdot\frac{W_1\cdot l_{ср1}}{a_1\cdot n_{эл}\cdot q_{эл}} = \frac{1}{41\cdot 10^6}\cdot\frac{80\cdot 0{,}85}{2\cdot 2\cdot 1{,}539\cdot 10^{-6}} = 0{,}27.$$

Активное сопротивление обмотки фазы, выраженное в относительных единицах:

$$r_{1*} = \frac{r_1 \cdot I_{1н}}{U_1} = \frac{0,27 \cdot 35,4}{220} = 0,043.$$

5.1.2. Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора.

При определении индуктивного сопротивления рассеяния обмоток условно различают три основных вида полей рассеяния: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмоток. Для каждого из этих полей определяют магнитную проводимость и после суммирования этих проводимостей вычисляют индуктивное сопротивление рассеяния обмотки.

Магнитная проводимость пазового рассеяния для диаметральных обмоток зависит только от геометрических размеров паза. Укорочение обмоток учитывается введением коэффициентов k_β и k'_β.

Коэффициент проводимости рассеяния пазов: трапецеидального полузакрытого по формуле (5.3):

$$\lambda_{п1} = \frac{h_1}{3 \cdot b_2} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b_2} + \frac{3h_k}{b_2 + 2 \cdot b_щ} + \frac{h_щ}{b_щ} \right) \cdot k'_\beta =$$

$$= \frac{14,5}{3 \cdot 7} \cdot 1,0 + \left(\frac{1}{7} + \frac{3 \cdot 3}{7 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} \right) \cdot 1,0 = 1,73.$$

Значения коэффициентов $k_\beta = 1$ и $k'_\beta = 1$ принимаются по рис. 5.2.

Магнитная проводимость рассеяния лобовых частей обмотки статора по формуле (5.6):

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) =$$

$$= 0,34 \cdot \frac{4}{0,18} \cdot (0,245 - 0,64 \cdot 1,0 \cdot 0,145) = 1,15.$$

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния статора по формуле (5.7):

$$\lambda_{Д1} = \frac{0,9 \cdot t_1 \cdot (k_{об1} \cdot q_1)^2 \cdot k_{р1} \cdot k_{щ1} \cdot k_{Д1}}{\delta \cdot k_\delta} =$$

$$= \frac{0,9 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,958 \cdot 4)^2 \cdot 0,81 \cdot 0,925 \cdot 0,0089}{0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,28} = 1,67,$$

где $k_{р1}$ – коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, наведенных в обмотке короткозамкнутого ротора высшими гармониками поля статора; значения $k_{р1}$ приведены в табл. 5.1;

$k_{щ1}$ – коэффициент, учитывающий влияние открытия пазов статора на проводимость дифференциального рассеяния по формуле (5.8):

$$k_{щ1} = 1 - \frac{0,033 b_{щ}^2}{t_1 \delta} = 1 - \frac{0,033 \cdot 3,7^2}{12,1 \cdot 0,5} = 0,925;$$

k_δ – коэффициент воздушного зазора по формуле (6.5):

$$k_\delta = k_{\delta 1} k_{\delta 2} = 1,09 \cdot 1,174 = 1,28;$$

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{щ}}{t_1 - b_{щ} + \frac{5\delta \cdot t_1}{b_{щ}}} = 1 + \frac{3,7}{12,1 - 3,7 + \frac{5 \cdot 0,5 \cdot 12,1}{3,7}} = 1,09;$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{щ}}{t_2 - b_{щ} + \frac{5\delta \cdot t_2}{b_{щ}}} = 1 + \frac{3,7}{15,2 - 3,7 + \frac{5 \cdot 0,5 \cdot 15,2}{3,7}} = 1,174;$$

значения $k_{Д1}$ приведены в табл. 5.2. $k_{Д1} = 0,0089$.

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки статора по формуле (5.9):

$$\lambda_1 = \lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1} = 1,73 + 1,67 + 1,15 = 4,55 .$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора по формуле (5.10), Ом:

$$x_1 = \frac{1,58 f_1 l_\delta W_1^2}{p q_1 \cdot 10^5}\lambda_1 = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 80^2}{2 \cdot 4 \cdot 10^5} = 0,52 ;$$

в относительных единицах по формуле (5.11):

$$x_{1*} = \frac{x_1 I_{1н}}{U_1} = \frac{0,52 \cdot 35,4}{220} = 0,084 .$$

5.2. Параметры обмотки короткозамкнутого ротора.

Ротор с овальными закрытыми пазами.

5.2.1. Активное сопротивление стержня клетки по формуле (5.12), Ом:

$$r_{ст} = \rho \frac{l_\delta}{q_{ст}} k_{в.т.} = \frac{0,18}{22 \cdot 10^6 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} = 0,62 \cdot 10^{-4},$$

где ρ – для алюминия $\rho_{115^\circ} = 1/22 \cdot 10^{-6}$ Ом·м;

$k_{в.т}$ – коэффициент вытеснения тока при частоте $f_2 = s f_1$, для рабочего режима $k_{в.т} = 1$.

5.2.2. Сопротивление короткозамыкающих колец, приведенное к току стержня, по формуле (5.13), Ом:

$$r_{кл} = \rho \frac{2\pi D_{кл.ср}}{Z_2 q_{кл} k_{пр2}^2} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,157}{22 \cdot 10^6 \cdot 38 \cdot 338 \cdot 10^{-6} \cdot 0,32^2} = 0,35 \cdot 10^{-4},$$

где $k_{пр2}$ – коэффициент приведения тока кольца к току стержня по формуле (5.14):

$$k_{пр2} = 2\sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{3,14 \cdot 2}{38}\right) = 0,32 .$$

5.2.3. Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора по формуле (5.15), Ом:

$$r_2' = k_{пр1}(r_{ст} + r_{кл}) = 1855 \cdot (0,62 \cdot 10^{-4} + 0,35 \cdot 10^{-4}) = 0,184 ;$$

в относительных единицах по формуле (5.16):

$$r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1н}}{U_1} = 0,184 \frac{35,4}{220} = 0,029 ,$$

где $k_{пр1}$ – коэффициент приведения сопротивления обмотки ротора к обмотке статора, по формуле (5.17):

$$k_{пр1} = \frac{4m_1}{Z_2}(W_1 k_{об1})^2 = \frac{4 \cdot 3}{38}(80 \cdot 0,958)^2 = 1855 .$$

5.2.4. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора по формуле (5.18), Ом:

$$x_2 = 7,9 f_1 l_\delta \lambda_2 \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 6,55 \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 10^{-3} ,$$

где λ_2 – коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора по формуле (5.19):

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} = 1,36 + 1,92 + 0,92 = 4,2 .$$

Коэффициент проводимости рассеяния пазов – овального закрытого (рис. 4.1, *б*) по формуле (5.21):

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2q_{ст}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{4r_1} \right] \psi + 0,3 + 1,12 \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} =$$

$$= \left[\frac{14,7 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}} \left(1 - \frac{3,14 \cdot 3,9^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + \right.$$

$$\left. + \ 0,66 - \frac{0,0015}{4 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}} \right] + 0,3 + 1,12 \frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}{35,4} = 1,36 ,$$

где ψ – коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока, для рабочего режима $\psi = 1$.

Для рабочего режима значение тока стержня ротора по формуле (5.22), А:

$$I_2 = \frac{2W_1 P_1 (0,2 + 0,8 \cdot \cos\varphi)}{U_1 Z_2} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 20\ 800 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot 0,89)}{220 \cdot 38} = 363 .$$

Значения P_1 и $\cos\varphi$ соответствуют ранее принятым.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния по формуле (5.23):

$$\lambda_{д2} = \frac{0,9 t_2 \left(\frac{Z_2}{6p} \right)^2 k_{д2}}{\delta k_\delta} = \frac{0,9 \cdot 0,0152 \left(\frac{38}{6 \cdot 2} \right)^2 \cdot 0,009}{0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,28} = 1,92 ,$$

где $k_{д2}$ – коэффициент дифференциального рассеяния ротора определяется по рис. 5.3 при $q_2 = Z_2 / 6p$.

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец по формуле (5.24):

$$\lambda_{кл} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l_2 k_{пр2}^2} \lg \frac{4,7D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2l_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 0,157}{38 \cdot 0,18 \cdot 0,32^2} \lg \frac{4,7 \cdot 0,157}{0,027 + 2 \cdot 0,011} = 0,92 .$$

5.2.5. Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, по формуле (5.25), Ом:

$$x_2' = k_{пр1} x_2 = 1855 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,56 ;$$

в относительных единицах по формуле (5.26):

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1н}}{U_1} = 0,56 \frac{35,4}{220} = 0,09 .$$

6. Намагничивающий ток

Расчет намагничивающего тока асинхронной машины основан на законе полного тока:

$$\oint_L Hdl = \sum i .$$

На практике прибегают к упрощенному вычислению интеграла, разбивая магнитную цепь на участки l_x с примерно постоянной напряженностью поля H_x вдоль участка. Тогда вместо интеграла получим:

$$\sum H_x l_x = \sum F .$$

Магнитную цепь асинхронной машины принято разбивать на пять участков: воздушный зазор δ, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора, спинка ротора.

Суммарная МДС всех участков:

$$\sum F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} .$$

Расчет намагничивающего тока ведется только для номинального режима работы двигателя.

6.1. Воздушный зазор.

Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс по формуле (6.4), А:

$$F_\delta = 0{,}8\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^6 = 0{,}8 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 1{,}26 \cdot 0{,}76 \cdot 10^6 = 383,$$

где $k_\delta = 1{,}26$ – коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние на магнитное сопротивление зазора зубчатости статора и ротора.

6.2. Зубцы статора.

Трапецеидальные полузакрытые пазы (рис. 3.1, *а*).

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца по формуле (6.6):

$$B_{z1} = \frac{B_\delta t_1}{b_{z1} k_c} = \frac{0{,}76 \cdot 0{,}0121}{5{,}4 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}97} = 1{,}76 .$$

Определяется напряженность магнитного поля в зубце H_z при $B_{z1} \le 1{,}8$ Тл по табл. П-3 (прил. 1).

Магнитное напряжение зубца статора по формуле (6.8), А:

$$F_{z1} = H_{z1} h_{\text{п}1} = 5400 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 108 .$$

6.3. Зубцы ротора.

Овальные закрытые пазы (рис. 4.1, *б*).

Магнитная индукция в равновеликом поперечном сечении зубца B_{z2} по п. 6.2:

$$B_{z2} = \frac{B_\delta t_2}{b_{z2} k_c} = \frac{0{,}76 \cdot 0{,}0152}{6{,}6 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}97} = 1{,}8 .$$

При $B_{z2} \le 1{,}8$ Тл напряженность поля принимается по табл. П-3 (прил. 1).

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце по формуле (6.15), м:

$$L_{z2} = h_{\text{п}2} - 1{,}2 r_2 = 0{,}022 - 1{,}2 \cdot 2{,}72 \cdot 10^{-3} = 18{,}7 \cdot 10^{-3} .$$

Магнитное напряжение в зубце ротора по формуле (6.16), А:

$$F_{z2} = H_{z2} L_{z2} = 7000 \cdot 18,7 \cdot 10^{-3} = 130,9 .$$

6.4. Спинка статора.

Индукция в спинке B_{c1} постоянна вдоль полюсного деления. Максимальное значение индукции в спинке статора – из п. 3.1.13.

$$B_{c1} = 1,45 \text{ Тл} .$$

Предполагая синусоидальное распределение индукции в спинке вдоль расчетной силовой линии, можно определить среднюю напряженность магнитного поля в спинке H_{c1}, используя формулу Симпсона (6.25):

$$H_{c1} = \frac{1}{18}[H(B_{c1}) + 4H(B_{c1} \cdot \sin 75°) + 2H(B_{c1} \cdot \sin 60°) +$$

$$+ 4H(B_{c1} \cdot \sin 45°) + 2H(B_{c1} \cdot \sin 30°) + 4H(B_{c1} \cdot \sin 15°)] =$$

$$= \frac{1}{18}(4400 + 4 \cdot 3100 + 2 \cdot 1760 + 4 \cdot 100 + 2 \cdot 800 + 4 \cdot 500) = 155 \text{ А/м},$$

где $H(B_{c1})$ определяется по табл. П-3 (прил. 1):

$$B_{c1} = 1,45 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1}) = 4400 \text{ А/м};$$

$$B_{c1} \cdot \sin(75°) = 1,404 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1} \cdot \sin(75°)) = 3100 \text{ А/м};$$

$$B_{c1} \cdot \sin(60°) = 1,259 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1} \cdot \sin(60°)) = 1760 \text{ А/м};$$

$$B_{c1} \cdot \sin(45°) = 1,028 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1} \cdot \sin(45°)) = 1000 \text{ А/м};$$

$$B_{c1} \cdot \sin(30°) = 0,727 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1} \cdot \sin(30°)) = 800 \text{ А/м};$$

$$B_{c1} \cdot \sin(15°) = 0,376 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1} \cdot \sin(15°)) = 500 \text{ А/м} .$$

Расчетная длина магнитной силовой линии по формуле (6.26), м:

$$L_{c1} = \frac{\pi(D_a - h_{c1})}{4p} = \frac{\pi \cdot (0,272 - 0,0249)}{4 \cdot 2} = 0,097 .$$

Магнитное напряжение спинки статора по формуле (6.27), А:

$$F_{c1} = H_{c1} L_{c1} = 155 \cdot 0,097 = 15 .$$

6.5. Спинка ротора.
Максимальное значение индукции в спинке ротора из п. 4.5:

$$B_{c2} = 0,82 \text{ Тл} \rightarrow H(B_{c1}) = 88 \text{ А/м} .$$

Расчетная длина магнитной силовой линии по формуле (6.28), м:
при $2p \geq 4$:

$$L_{c2} = \frac{\pi(D_{2B} + h_{c2})}{4p} = \frac{\pi \cdot (0,042 + 0,044)}{4 \cdot 2} = 0,034 .$$

$D_{2B} = 0,042$ (см. п. 2.10).
Магнитное напряжение спинки ротора по формуле (6.29), А:

$$F_{c2} = H_{c2} L_{c2} = 88 \cdot 0,034 = 3 .$$

6.6. Параметры магнитной цепи.
Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс по формуле (6.30), А:

$$\sum F = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} = 383 + 108 + 130,9 + 15 + 3 = 639 .$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи по формуле (6.31):

$$k_\mu = \frac{\sum F}{F_\delta} = \frac{639}{383} = 1,67 .$$

Намагничивающий ток по формуле (6.32), А:

$$I_\mu = \frac{2,22 \sum F \cdot p}{m_1 W_1} = \frac{2,22 \cdot 639 \cdot 2}{3 \cdot 80} = 11,9 ,$$

в процентах номинального тока по формуле (6.33):

$$I_{\mu\%} = \frac{I_\mu \cdot 100}{I_{1н}} = \frac{11{,}9 \cdot 100}{35{,}4} = 33{,}4\ \%.$$

Главное индуктивное сопротивление по формуле (6.34), Ом:

$$x_m = \frac{E}{I_\mu} = \frac{213}{11{,}9} = 17{,}9,$$

где $E = k_e U_1 = 0{,}97 \cdot 220 = 213\ (\text{В})$,

в относительных единицах по формуле (6.35):

$$x_{m*} = x_m \frac{I_{1н}}{U_1} = 17{,}9 \cdot \frac{35{,}4}{220} = 2{,}88.$$

Коэффициент рассеяния статора по формуле (6.36):

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m} = \frac{0{,}52}{17{,}9} = 0{,}029.$$

Коэффициент сопротивления статора по формуле (6.37):

$$\rho_1 = \frac{r_1}{x_1 + x_m} = \frac{0{,}27}{0{,}52 + 17{,}9} = 0{,}015.$$

7. Режим холостого хода

7.1. Реактивная составляющая тока холостого хода по формуле (7.1), А:

$$I_{op} \approx I_{c.p} = \frac{U_1}{x_m(1+\tau_1)\left(1+\rho_1^2\right)} = \frac{220}{17{,}9 \cdot (1+0{,}029)} = 11{,}9.$$

Если коэффициент сопротивления статора $\rho_1 < 0{,}1$, то принимать $\rho_1^2 = 0$.

7.2. Электрические потери в обмотке статора по формуле (7.2), Вт:

$$P_{c.м1} = m_1 I_{0p}^2 r_1 \left(1 + \rho_1^2\right) = 3 \cdot 11,9^2 \cdot 0,27 = 115 .$$

7.3. Магнитные потери в зубцах статора по формуле (7.3) Вт:

$$P_{z1} = 1,7\, p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} B_{z1cp}^2 G_{z1} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot 1,76^2 \cdot 7,06 = 93,$$

где коэффициент 1,7 учитывает влияние технологического процесса изготовления сердечника статора, а также неравномерности распределения индукции;

$p_{1,0/50} = 2,5\left(\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}\right)$ – удельные потери в стали при частоте перемагничивания 50 Гц и магнитной индукции 1 Тл;

G_{z1} – расчетная масса стали зубцов статора при трапецеидальных полузакрытых пазах по формуле (7.4), кг:

$$G_{z1} = 7,8 Z_1 b_{z1} h_{п1} l_\delta k_c \cdot 10^3 =$$

$$= 7,8 \cdot 48 \cdot 5,4 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} 0,18 \cdot 0,97 \cdot 10^3 = 7,06 \text{ кг.}$$

7.4. Магнитные потери в спинке статора по формуле (7.6), Вт:

$$P_{c1} = 1,7\, p_{1,0/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} B_{c1}{}^2 G_{c1} = 1,7 \cdot 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot 1,45^2 \cdot 26,3 = 234,8 ,$$

где G_{c1} – расчетная масса спинки статора по формуле (7.7), кг:

$$G_{c1} = 7,8\pi(D_a - h_{c1}) h_{c1} l_\delta k_c \cdot 10^3 =$$

$$= 7,8 \cdot \pi \cdot (0,272 - 0,0249) \cdot 0,0249 \cdot 0,18 \cdot 0,97 \cdot 10^3 = 26,3.$$

7.5. Суммарные магнитные потери в сердечнике статора при холостом ходе, включающие добавочные потери в стали, по формуле (7.8), Вт:

$$\sum P_c = P_{z1}\left(1+2\sqrt{\frac{t_1}{10}(k_\delta-1)^3}\right)+P_{c1}=$$

$$=93\cdot\left(1+2\cdot\sqrt{\frac{12{,}1\cdot10^{-3}}{10}\cdot(1{,}26-1)^3}\right)+234{,}8=329{,}8.$$

7.6. Механические потери по формуле (7.9), Вт:

$$\sum P_{\text{мх}}=k_{\text{мх}}\left(\frac{n}{10}\right)^2 D_a^4=0{,}95\cdot\left(\frac{1500}{10}\right)^2\cdot(0{,}272)^4=117\,,$$

где $k_{\text{мх}}=1{,}3\cdot(1-D_a)=1{,}3\cdot(1-0{,}272)=0{,}95$.

7.7. Активная составляющая тока холостого хода по формуле (7.10), А:

$$I_{oa}=\frac{P_{c.\text{м}1}+\sum P_c+\sum P_{\text{мх}}}{m_1U_1}=\frac{115+329{,}8+117}{3\cdot220}=0{,}85\,.$$

7.8. Ток холостого хода по формуле (7.11), А:

$$I_o=\sqrt{I_{oa}^2+I_{op}^2}=\sqrt{0{,}85^2+11{,}9^2}=11{,}93\,.$$

7.9. Коэффициент мощности при холостом ходе по формуле (7.12):

$$\cos\varphi_o=\frac{I_{oa}}{I_o}=\frac{0{,}85}{11{,}93}=0{,}071\,.$$

8. Номинальный режим и рабочие характеристики

Рабочие характеристики асинхронных двигателей могут быть построены либо с помощью круговых диаграмм, либо аналитическим путем по схеме замещения. В настоящем проекте в основу расчетного определения рабочих пусковых характеристик положена схема замещения, изображенная на рис. 8.1.

Магнитные потери в сердечнике учтены эквивалентным сопротивлением r_c, включенным непосредственно на выводы. Это сделано с допущением, что потери в стали создаются магнитным потоком, соответствующим полному потокосцеплению обмотки статора.

8.1. Параметры схемы замещения по формуле (8.1), Ом:

$$r_1' = r_1 = 0,27\,;$$

$$x_1' = x_1 \cdot (1+\tau_1)\cdot\left(1+\frac{r_1\rho_1}{x_1}\right) = 0,52\cdot(1+0,029)\cdot\left(1+\frac{0,27\cdot 0,015}{0,52}\right) = 0,54\,;$$

$$r_2'' = r_2'(1+\tau_1)^2\left(1+\rho_1^2\right) = 0,184\cdot(1+0,029)^2\cdot(1+0,015^2) = 0,19\,;$$

$$x_2'' = x_2'(1+\tau_1)^2\left(1+\rho_1^2\right) = 0,56\cdot(1+0,029)^2\cdot(1+0,015^2) = 0,58\,.$$

8.2. Расчетные параметры короткого замыкания по формуле (8.2), Ом:

$$r_k = r_1' + r_2'' = 0,27+0,19 = 0,46\,;$$

$$x_k = x_1' + x_2'' = 0,54+0,58 = 1,12\,;$$

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \sqrt{0,46^2 + 1,12^2} = 1,21\,.$$

8.3. Полное сопротивление схемы замещения при бесконечно большом скольжении по формуле (8.3), Ом:

$$Z_\infty = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} = \sqrt{0.27^2 + 1,12^2} = 1.17\,.$$

8.4. Механическая мощность двигателя по формуле (8.4), Вт:

$$P_2' = P_2 + \sum P_{\text{мх}} + P_{\text{д}} = 18\ 500 + 117 + 104 = 18\ 721,$$

где $P_{\text{д}}$ – добавочные потери при номинальной нагрузке по формуле (8.5), Вт:

$$P_{\text{д}} = 0{,}005 \frac{P_2}{\eta} = 0{,}005 \cdot \frac{18500}{0{,}89} = 104.$$

8.5. Сопротивление схемы замещения $R_{\text{н}}$ по формуле (8.6), Ом:

$$R_{\text{н}} = \frac{m_1 U_1^2}{2P_2'} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m_1 U_1^2}{2P_2'} - r_k\right)^2 - Z_k^2} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 18\ 721} - 0{,}46 + \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 18\ 721} - 0{,}46\right)^2 - 1{,}21^2} = 6{,}6.$$

8.6. Полное сопротивление схемы замещения по формуле (8.7), Ом:

$$Z_{\text{н}} = \sqrt{(R_{\text{н}} + r_k)^2 + x_k^2} = \sqrt{(6{,}6 + 0{,}46)^2 + 1{,}12^2} = 7{,}15.$$

8.7. Скольжение по формуле (8.8):

$$S_{\text{н}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{н}}}{r_2''}} = \frac{1}{1 + \frac{6{,}6}{0{,}19}} = 0{,}028.$$

8.8. Активная и реактивная составляющая тока статора при синхронном вращении по формуле (8.9), А:

$$I_{c.a} = \frac{P_{\text{с.м1}} + \sum P_c}{m_1 U_1} = \frac{115 + 329{,}8}{3 \cdot 220} = 0{,}674;$$

$$I_{c.p.}=\frac{U_1}{x_m\cdot(1+\tau_1)\cdot\left(1+\rho_1^2\right)}=\frac{220}{17{,}9\cdot(1+0{,}029)\cdot(1+0{,}015^2)}=11{,}9\,.$$

8.9. Расчетный ток ротора по формуле (8.10), А:

$$I_2''=\frac{U_1}{Z_\text{н}}=\frac{220}{7{,}15}=30{,}8\,.$$

8.10. Фазный ток статора по формуле (8.11), А:

$$I_1=\sqrt{I_{a1}^2+I_{p1}^2}=\sqrt{31{,}2^2+15{,}9^2}=35\,,$$

где I_{a1} и $I_{\text{p}1}$ – активная и реактивная составляющие тока статора по формуле (8.12), А:

$$I_{a1}=I_{c.a}+I_2''\left(\frac{R_\text{н}+r_k}{Z_\text{н}}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2}+\frac{x_k}{Z_\text{н}}\cdot\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right)=$$

$$=0{,}674+30{,}8\cdot\left(\frac{6{,}6+0{,}46}{7{,}15}\cdot\frac{1-0{,}015^2}{1+0{,}015^2}+\frac{1{,}12}{7{,}15}\cdot\frac{2\cdot0{,}015}{1+0{,}015^2}\right)=31{,}2;$$

$$I_{p1}=I_{c.p}+I_2''\left(\frac{x_k}{Z_\text{н}}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2}-\frac{R_\text{н}+r_k}{Z_k}\cdot\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right)=$$

$$=11{,}9+30{,}8\cdot\left(\frac{1{,}12}{7{,}15}\cdot\frac{1-0{,}015^2}{1+0{,}015^2}-\frac{6{,}6+0{,}46}{7{,}15}\cdot\frac{2\cdot0{,}015}{1+0{,}015^2}\right)=15{,}9.$$

8.11. Коэффициент мощности по формуле (8.13):

$$\cos\varphi=\frac{I_{a1}}{I_1}=\frac{31{,}2}{35}=0{,}89\,.$$

8.12. Линейная нагрузка статора по формуле (8.14), А/м:

$$A_1 = I_1 \frac{u_{\text{п}}}{a_1 t_1} = 35 \cdot \frac{20}{2 \cdot 12{,}1 \cdot 10^{-3}} = 28\ 926\ .$$

8.13. Линейная нагрузка ротора по формуле (8.15), А/м:

$$A_2 = A_1 \frac{I_2''(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho_1^2}}{I_1} \cdot \frac{k_{\text{об}1}}{k_{\text{ск}}} =$$

$$= 28\ 926 \cdot \frac{30{,}8 \cdot (1+0{,}029) \cdot \sqrt{1+0{,}015^2}}{35} \cdot 0{,}958 = 25\ 096\ ,$$

где $k_{\text{ск}} = 1$.

8.14. Ток в стержне короткозамкнутого ротора по формуле (8.16), А:

$$I_{\text{ст}} = I_2'' \frac{2 m_1 w_1 k_{\text{об}1}}{Z_2}(1+\tau_1)\sqrt{1+\rho_1^2} =$$

$$= 30{,}8 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 80 \cdot 0{,}958}{38} \cdot (1+0{,}015) \cdot \sqrt{1+0{,}029^2} = 378.$$

8.15. Ток в короткозамыкающем кольце по формуле (8.17), А:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{ст}}}{k_{\text{пр.2}}} = \frac{378}{0{,}32} = 1180\ .$$

8.16. Плотность тока в обмотке статора, в стержне короткозамкнутого ротора и в короткозамыкающем кольце по формуле (8.20), А/м^2:

$$J_1 = \frac{I_1}{n_{\text{эл}} q_{\text{эл}} a} = \frac{35}{2 \cdot 1{,}539 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 5{,}72 \cdot 10^6;$$

$$J_{\text{ст}} = \frac{I_{\text{ст}}}{q_{\text{ст}}} = \frac{378}{133 \cdot 10^{-6}} = 2{,}84 \cdot 10^6;$$

$$J_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{q_{\text{кл}}} = \frac{1180}{338 \cdot 10^{-6}} = 3{,}49 \cdot 10^6.$$

8.17. Электрические потери в обмотке статора при нагрузке по формуле (8.21), Вт:

$$P_{\text{м}1} = m_1 I_1^2 r_1 = 3 \cdot 35^2 \cdot 0{,}27 = 992\,.$$

8.18. Элсктричсскис потсри в обмоткс ротора при нагрузкс по формуле (8.22), Вт:

$$P_{\text{м}2} = m_1 I_2''^2 r_2'' = 3 \cdot 30{,}8^2 \cdot 0{,}19 = 540\,.$$

8.19. Суммарные потери в двигателе по формуле (8.23), Вт:

$$\sum P = P_{\text{м}1} + P_{\text{м}2} + \sum P_c + \sum P_{\text{мх}} + P_{\text{д}} =$$

$$= 992 + 540 + 329{,}8 + 117 + 104 = 2083.$$

8.20. Подводимая мощность двигателя по формуле (8.24), Вт:

$$P_1 = P_2 + \sum P = 18\ 500 + 2083 = 20\ 583\,.$$

8.21. Коэффициент полезного действия двигателя по формуле (8.25), %:

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum P}{P_1}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{2083}{20583}\right) \cdot 100 = 89{,}9\,.$$

8.22. Проверка проведенного расчета по формуле (8.26):

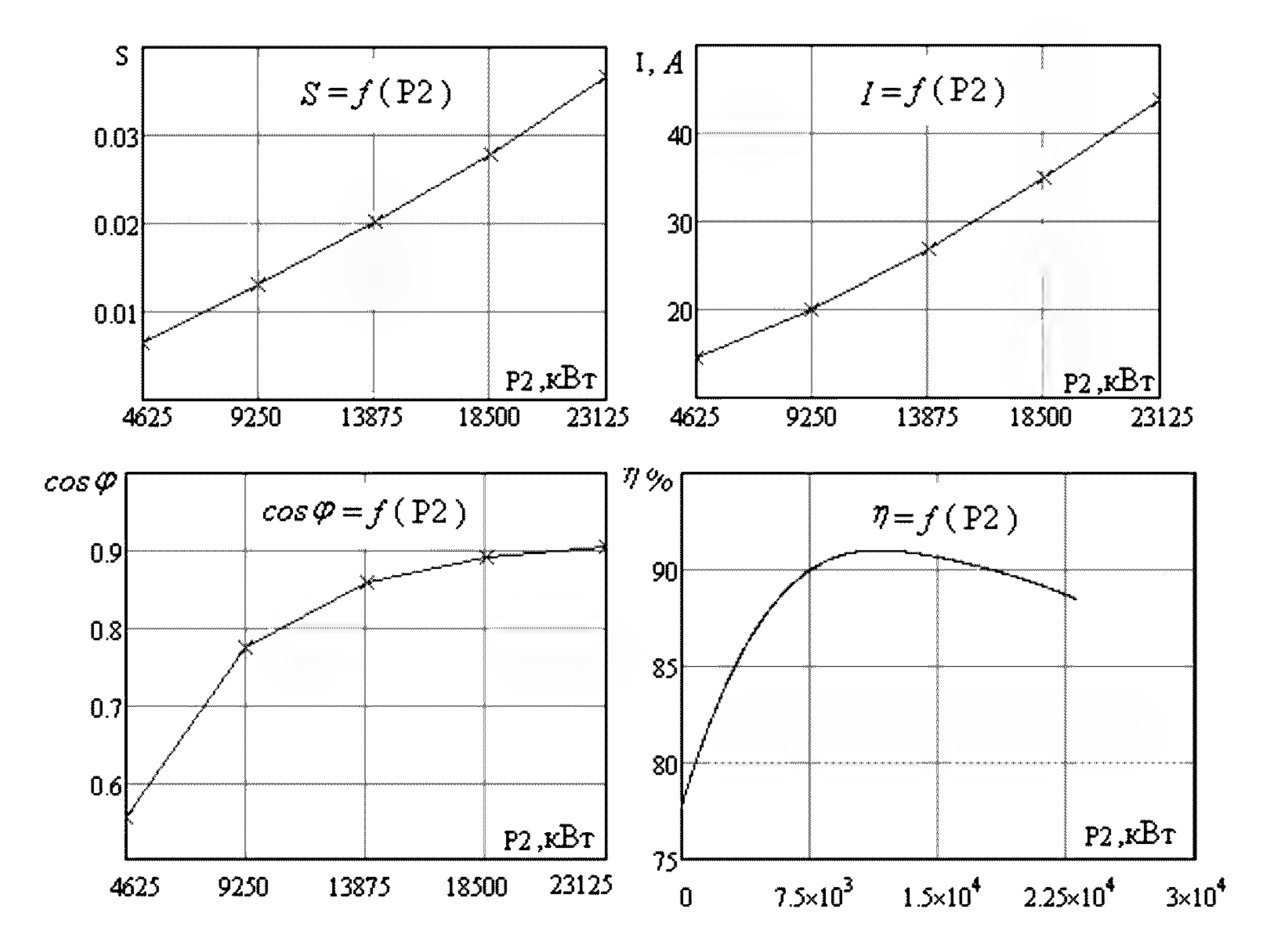
$$P_1 = m_1 I_{a1} U_1 = 3 \cdot 31{,}2 \cdot 220 = 20\ 592;$$

$$P_2 = m_1 I_1 U_1 \eta \cos\varphi = 3 \cdot 35 \cdot 220 \cdot 0{,}899 \cdot 0{,}89 = 18\ 483.$$

8.23. Расчет рабочих характеристик $(s,\ I_1,\ \cos\varphi,\ \eta) = f(P_2)$ производится для значений мощности kP_2, где k = 0,25; 0,5; 0,75; 1,25. Расчет ведется с п. 8.4 так же, как и для номинального режима (k = 1,0). Результаты расчета сведены в таблице. Рассчитанные характеристики представлены на рисунке.

Рабочие характеристики

Условные обозначения	Отдаваемая мощность в долях от номинальной Р2				
	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25
s, о. е.	0,006	0,013	0,02	0,028	0,037
I_1, А	14,427	19,925	26,953	34,934	43,763
cos φ	0,556	0,774	0,858	0,891	0,904
η, %	87,312	90,734	90,82	89,906	88,462
Р2, кВт	4625	9250	13 875	18 500	23 125



Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчет рабочих характеристик проводился с применением системы MathCAD. Программа расчета представлена в приложении 2.

9. Начальный пусковой момент и начальный пусковой ток

Пусковые свойства электродвигателей оцениваются величиной пускового момента и пускового тока. Отношение начального пускового момента к номинальному $M_п/M_н$ должно быть не ниже, а отношение начального пускового тока не выше значений, оговоренных в ГОСТ 19523-74.

Расчет величин пускового момента и пускового тока необходимо производить с учетом вытеснения тока в обмотках и насыщения потоков пазового рассеяния.

9.1. Активные сопротивления для ротора с овальными закрытыми пазами с учетом вытеснения тока по п. 5.2.1, где значения коэффициента $k_{в.т}$ находятся в следующем порядке.

Рассчитывается коэффициент ξ при температуре 115° по формуле (9.1):

$$\xi_{115°} = 64 h_{ст}\sqrt{s} = 64 \cdot 0,021 = 1,34\,,$$

где $h_{ст} = h_{п2} - h_2 - h_щ = 0,022 - 0,3 \cdot 10^{-3} - 0,7 \cdot 10^{-3} = 0,021$ – высота стержня клетки ротора при закрытых пазах в м (рис. 4.1, *б*);

s – скольжение, в момент пуска s = 1,0.

Расчетная глубина проникновения тока в стержне по формуле (9.2), м:

$$h_p = \frac{h_{ст}}{(1+\varphi)} = \frac{0,022}{1+0,2} = 0,018\,,$$

где коэффициент $\varphi = f(\xi) = 0,2$ определяют из рис. 9.1.

Ширина стержня на расчетной глубине проникновения тока по формуле (9.3), м:

$$b_p = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1}(h_p - r_1) =$$

$$= 2 \cdot 0,0039 - \frac{2 \cdot (0,0039 - 0,0027)}{0,0081}(0,018 - 0,0039) = 0,00362.$$

Площадь поперечного сечения стержня при расчетной глубине проникновения тока по формуле (9.4), м^2:

$$q_p = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left(r_1 + \frac{b_p}{2} \right) \left(h_p - r_1 \right) =$$

$$= \frac{3,14}{2} \cdot 0,0039^2 + \left(0,0039 + \frac{0,00362}{2} \right) (0,018 - 0,0039) = 103,8 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент вытеснения тока по формуле (9.5):

$$k_{\text{в.т}} = \frac{q_{\text{ст}}}{q_p} = \frac{133 \cdot 10^{-6}}{103,8 \cdot 10^{-6}} = 1,28;$$

$$r_{\text{ст}} = \rho \frac{l_\delta}{q_{\text{ст}}} k_{\text{в.т}} = \frac{0,18}{22 \cdot 10^6 \cdot 133 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,28 = 0,8 \cdot 10^{-4}.$$

Активные сопротивления для ротора:

$$r_2' = k_{\text{пр1}} (r_{\text{ст}} + r_{\text{кл}}) = 1855 \cdot (0,8 \cdot 10^{-4} + 0,35 \cdot 10^{-4}) = 0,21,$$

где $r_{\text{кл}} = 0,35 \cdot 10^{-4}$ Ом (см. п. 5.2.2).

9.2. Индуктивное сопротивление рассеяния с учетом вытеснения тока ротора с овальными закрытыми пазами определяется по п. 5.2.4 с подстановкой $\psi = f(\xi)$ из рис. 9.1, (ξ) из п. 9.1.

Коэффициент ψ определяют по рис. 9.1 в зависимости от значения ξ, рассчитанного в п. 9.1.

$$\psi = 0,97.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора по формуле (5.18), Ом:

$$x_2 = 7,9 f_1 l_\delta \lambda_2 \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,18 \cdot 4,18 \cdot 10^{-6} = 0,3 \cdot 10^{-3},$$

где λ_2 – коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора по формуле (5.19):

$$\lambda_2 = \lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{кл} = 1,34 + 1,92 + 0,92 = 4,18\,.$$

Коэффициент проводимости рассеяния пазов – овального закрытого (рис. 4.1, *б*) по формуле (5.21):

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1}\left(1 - \frac{\pi \cdot r_1^2}{2q_{ст}}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{4r_1}\right] \cdot \psi + 0,3 + 1,12\frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} =$$

$$= \left[\frac{14,7 \cdot 10^{-3} + 0,8 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}\left(1 - \frac{3,14 \cdot 3,9^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 133 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \; 0,66 - \frac{0,0015}{4 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3}}\right] \cdot 0,97 + 0,3 + 1,12\frac{0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3}{35,4} = 1,34\,.$$

Для рабочего режима значение тока стержня ротора по формуле (5.22), А:

$$I_2 = \frac{2W_1P_1(0,2 + 0,8\cos\phi)}{U_1Z_2} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 20589 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot 0,89)}{220 \cdot 38} = 367\,.$$

Значения P_1 и $\cos\varphi$ соответствуют ранее принятым.

Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния по формуле (5.23):

$$\lambda_{д2} = \frac{0,9t_2\left(\frac{Z_2}{6p}\right)^2 k_{д2}}{\delta k_\delta} = \frac{0,9 \cdot 0,0152\left(\frac{38}{6 \cdot 2}\right)^2 \cdot 0,009}{0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,28} = 1,92\,,$$

где $k_{д2}$ – коэффициент дифференциального рассеяния ротора – определяется по рис. 5.3 при $q_2 = Z_2/6p$.

Коэффициент проводимости рассеяния короткозамыкающих колец по формуле (5.24):

$$\lambda_{\text{кл}} = \frac{2{,}3D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 l_2 k_{\text{пр2}}^2} \lg \frac{4{,}7D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2l_{\text{кл}}} = \frac{2{,}3 \cdot 0{,}157}{38 \cdot 0{,}18 \cdot 0{,}32^2} \lg \frac{4{,}7 \cdot 0{,}157}{0{,}027 + 2 \cdot 0{,}011} = 0{,}92 .$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора, по формуле (5.25), Ом:

$$x_2' = k_{\text{пр1}} x_2 = 1855 \cdot 0{,}3 \cdot 10^{-3} = 0{,}56 ,$$

в относительных единицах по формуле (5.26):

$$x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1\text{н}}}{U_1} = 0{,}56 \frac{35{,}4}{220} = 0{,}09 .$$

9.3. Значения сопротивлений r_1', r_2'', x_1', x_2'' определяют согласно п. 8.1, сопротивлений r_k, x_k, Z_k – согласно п. 8.2.

Параметры схемы замещения, Ом:

$$r_1' = r_1 = 0{,}27 ;$$

$$x_1' = x_1 (1 + \tau_1) \left(1 + \frac{r_1 \rho_1}{x_1} \right) = 0{,}54 ;$$

$$r_2'' = r_2' (1 + \tau_1)^2 \left(1 + \rho_1^2 \right) = 0{,}21 \cdot (1 + 0{,}029)^2 \cdot \left(1 + 0{,}015^2 \right) = 0{,}222 ;$$

$$x_2'' = x_2' (1 + \tau_1)^2 \left(1 + \rho_1^2 \right) = 0{,}58 .$$

Расчетные параметры короткого замыкания, Ом:

$$r_k = r_1' + r_2'' = 0{,}27 + 0{,}222 = 0{,}492 ;$$

$$x_k = x_1' + x_2'' = 0{,}54 + 0{,}58 = 1{,}12 ;$$

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \sqrt{0{,}492^2 + 1{,}12^2} = 1{,}22 .$$

9.4. Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения, по формуле (9.9), паз трапецеидальный полузакрытый (рис. 5.1, *а*):

$$\lambda_{\text{п1пер}} = \left(\frac{3h_k}{b_{\text{п1}} + 2b_{\text{щ}}} + \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} \right) k'_{\beta} =$$

$$= \left(\frac{3 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 3{,}7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3{,}7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 1 = 0{,}895 .$$

Здесь $k'_{\beta} = 1$ – коэффициент, определяемый по рис. 5.2.

9.5. Составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения, по формуле (9.11):

$$\lambda_{\text{1пер}} = \lambda_{\text{п1пер}} + \lambda_{\text{Д1}} = 0{,}895 + 1{,}67 = 2{,}565 .$$

9.6. Составляющая коэффициента пазовой проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения (паз овальный закрытый), по формуле (9.12):

$$\lambda_{\text{п2пер}} = \frac{h_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3{,}7 \cdot 10^{-3}} = 0{,}27 .$$

9.7. Составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения, по формуле (9.14):

$$\lambda_{\text{2пер}} = \lambda_{\text{п2пер}} + \lambda_{\text{Д2}} = 0{,}27 + 1{,}92 = 2{,}19 .$$

9.8. Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения (паз овальный закрытый), по формуле (9.15), Ом:

$$x_{\text{пер}} = x'_1 \frac{\lambda_{\text{1пер}}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{\text{2пер}}}{\lambda_2} = 0{,}54 \cdot \frac{2{,}565}{4{,}55} + 0{,}58 \cdot \frac{2{,}19}{4{,}18} = 0{,}608 .$$

9.9. Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя с овальными закрытыми пазами, не зависящее от насыщения, по формуле (9.17) Ом:

$$x_{\text{пост}} = x_1' \frac{\lambda_1 - \lambda_{1\text{пер}}}{\lambda_1} + x_2'' \frac{\lambda_2 - \lambda_{2\text{пер}}}{\lambda_2} =$$

$$= 0,54 \cdot \frac{4,55 - 2,565}{4,55} + 0,58 \cdot \frac{4,18 - 2,19}{4,18} = 0,512\,.$$

9.10. Расчетный ток ротора при пуске по формуле (9.19), А:

$$I''_{\text{п}2} = \frac{U_1}{\sqrt{r_k^2 + (x_{\text{пост}} + 0,0825 x_{\text{пер}})^2}} -$$

$$- \frac{1,24 \cdot 10^6 \delta \cdot a_1 x_{\text{пер}} (x_{\text{пост}} + 0,0825 x_{\text{пер}})}{u_{\text{п}} \left[r_k^2 + (x_{\text{пост}} + 0,0825 x_{\text{пер}})^2 \right]} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{0,49^2 + (0,512 + 0,25 \cdot 0,608)^2}} -$$

$$- \frac{1,24 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 0,608 \cdot (0,512 + 0,25 \cdot 0,608)}{20 \cdot \left[0,49^2 + (0,512 + 0,25 \cdot 0,608)^2 \right]} = 229,84\,.$$

9.11. Расчетные параметры схемы замещения при пуске с учетом вытеснения тока в стержнях ротора и насыщения путей потоков рассеяния по формуле (9.20), Ом:

$$Z_k = \frac{U_1}{I''_{\text{п}2}} = \frac{220}{229,84} = 0,957\,;$$

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{0,957^2 - 0,49^2} = 0,822\,.$$

9.12. Активная составляющая тока статора при пуске по формуле (9.21), А:

$$I_{\text{п.а}1} = I_{c.a} + I''_{\text{п}2}\left(\frac{r_k}{Z_k}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_k}\cdot\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right) =$$

$$= 0,674 + 229,84\cdot\left(\frac{0,49}{0,957}\cdot\frac{1-0,015^2}{1+0,015^2} + \frac{0,822}{0,957}\cdot\frac{2\cdot 0,015}{1+0,015^2}\right) = 124,22\,.$$

9.13. Реактивная составляющая тока статора при пуске по формуле (9.22), А:

$$I_{\text{п.р}1} = I_{c.p} + I''_{\text{п}2}\left(\frac{x_k}{Z_k}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} - \frac{r_k}{Z_k}\cdot\frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right) =$$

$$= 11,9 + 229,84\cdot\left(\frac{0,822}{0,957}\cdot\frac{1-0,015^2}{1+0,015^2} - \frac{0,49}{0,957}\cdot\frac{2\cdot 0,015}{1+0,015^2}\right) = 205,7\,.$$

9.14. Фазный ток статора при пуске по формуле (9.23) А:

$$I_{\text{п}1} = \sqrt{I_{\text{п.а}1}^2 + I_{\text{п.р}1}^2} = \sqrt{124,22^2 + 205,7^2} = 240,3\,.$$

9.15. Кратность пускового тока $I_{\text{п}1}/I_{1\text{н}}$:

$$k_{\text{пуск.ток}} = \frac{I_{\text{п}1}}{I_{1\text{н}}} = \frac{240,3}{35} = 6,87\,.$$

Согласно ГОСТ 19523-74 кратность пускового тока не должна превышать значение $K_{\text{пуск.токГОСТ}} = 7$, т. е. условие выполняется.

9.16. Кратность пускового момента по формуле (9.24):

$$\frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}} = \frac{m_1 I''^2_{\text{п}2} r''_2 (1-s_{\text{н}})}{P_2} = \frac{3\cdot 229,84^2\cdot 0,222\cdot(1-0,028)}{18\,483} = 1,85\,.$$

Согласно ГОСТ 19523-74 кратность пускового момента не должна быть меньше значения $K_{\text{пуск.токГОСТ}} = 1{,}8$, т. е. условие выполняется.

10. Максимальный момент

Отношение максимального момента к номинальному $\dfrac{M_{\max}}{M_{\text{н}}}$ не должно быть менее значений, указанных в ГОСТ 19523-74.

Расчет максимального момента следует производить с учетом насыщения путей потоков рассеяния, так как при максимальном моменте ток статора и ротора в 2–3 раза больше, чем при номинальном. Вытеснением тока в стержне ротора можно пренебречь, так как частота f_2 в этом режиме мала.

10.1. Расчетный ток ротора по формуле (10.1) А:

$$I''_{\text{м}2} = \frac{U_1}{\sqrt{2\cdot\left[r_1'^2 + \left(x_{\text{пост}} + 0{,}0825\cdot x_{\text{пер}}\right)^2 + r_1'\cdot\left(x_{\text{пост}} + 0{,}0825\cdot x_{\text{пер}}\right)\right]}} -$$

$$- \frac{1{,}24\cdot 10^3\cdot\delta\cdot a_1\cdot\left[r_1' + 2\cdot\left(x_{\text{пост}} + 0{,}0825\cdot x_{\text{пер}}\right)\right]\cdot x_{\text{пер}}}{2\cdot u_{\text{п}}\cdot\left[r_1'^2 + \left(x_{\text{пост}} + 0{,}0825\cdot x_{\text{пер}}\right)^2 + r_1'\cdot\left(x_{\text{пост}} + 0{,}0825\cdot x_{\text{пер}}\right)\right]} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{2\cdot\left[0{,}27^2 + (0{,}512 + 0{,}25\cdot 0{,}608)^2 + 0{,}27\cdot(0{,}512 + 0{,}25\cdot 0{,}608)\right]}} -$$

$$- \frac{1{,}24\cdot 10^3\cdot 0{,}5\cdot 2\cdot[0{,}27 + 2\cdot(0{,}512 + 0{,}25\cdot 0{,}608)]\cdot 0{,}608}{2\cdot 20\cdot\left[0{,}27^2 + (0{,}512 + 0{,}25\cdot 0{,}608)^2 + 0{,}27\cdot(0{,}512 + 0{,}25\cdot 0{,}608)\right]} =$$

$$= 143{,}4\,.$$

10.2. Сопротивления схемы замещения при максимальном моменте по формуле (10.2), Ом:

$$Z_{м} = \frac{U_1}{I''_{м2}} = \frac{220}{143,4} = 1,534,$$

$$x_k = \sqrt{Z_{\infty}^2 - r_1'^2} = \sqrt{1,085^2 - 0,27^2} = 1,051,$$

$$R_{м} = Z_{\infty} + r_1' = 1,085 + 0,27 = 1,355,$$

где сопротивление по формуле (10.3):

$$Z_{\infty} = \frac{\sqrt{r_1'^2 + 2 \cdot Z_{м}^2 - r_1^2}}{2} = \frac{\sqrt{0,27^2 + 2 \cdot 1,534^2 - 0,27^2}}{2} = 1,085.$$

10.3. Активная составляющая тока статора по формуле (10.4), А:

$$I_{м.а1} = I_{с.а} + I''_{м2}\left(\frac{R_{м}}{Z_{м}} \cdot \frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_{м}} \cdot \frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right) =$$

$$= 0,674 + 143,4 \cdot \left(\frac{1,355}{1,534} \cdot \frac{1+0,015^2}{1-0,015^2} + \frac{1,051}{1,534} \cdot \frac{2 \cdot 0,015}{1+0,015^2}\right) = 130,3.$$

10.4. Реактивная составляющая тока статора по формуле (10.5), А:

$$I_{м.р1} = I_{c.p} + I''_{м2}\left(\frac{x_k}{Z_{м}} \cdot \frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} - \frac{R_{м}}{Z_{м}} \cdot \frac{2\rho_1}{1+\rho_1^2}\right) =$$

$$= 11,9 + 143,4 \cdot \left(\frac{1,051}{1,534} \cdot \frac{1-0,015^2}{1+0,015^2} + \frac{1,355}{1,534} \cdot \frac{2 \cdot 0,015}{1+0,015^2}\right) = 114.$$

10.5. Ток фазы статора по формуле (10.6), А:

$$I_{м1} = \sqrt{I_{м.а1}^2 + I_{м.р1}^2} = \sqrt{130,3^2 + 114^2} = 173.$$

10.6. Кратность максимального момента по формуле (10.7):

$$\frac{M_{\max}}{M_{н}} = \frac{m_1 U_1^2 (1 - s_{н})}{2 R_{м} P_2} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,028)}{2 \cdot 1,355 \cdot 18\ 483} = 2,8 .$$

Согласно ГОСТ 19523-74 кратность максимального момента не должна быть меньше значения $K_{пуск.момГОСТ} = 2,2$, т. е. условие выполняется.

10.7. Скольжение при максимальном моменте по формуле (10.8):

$$s_{м} = \frac{r_2''}{Z_{\infty}} = \frac{0,222}{1,085} = 0,205 .$$

11. Тепловой расчет двигателя

11.1. Электрические потери в пазовой части $P'_{э,п1}$ и потери в лобовых частях катушек $P'_{э,л1}$, по формуле (11.1), Вт:

$$P'_{э,п1} = k_{\rho} P_{м1} \frac{2 l_1}{l_{ср.1}} = 1,07 \cdot 992 \frac{2 \cdot 0,18}{0,85} = 450 ,$$

$$P'_{э,л1} = k_{\rho} P_{м1} \frac{2 l_{л1}}{l_{ср1}} = 1,07 \cdot 992 \frac{2 \cdot 0,245}{0,85} = 611 .$$

Здесь k_{ρ} = 1,07 – коэффициент увеличения потерь по табл. 11.1.

11.2. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины по формуле (11.2), °С:

$$\Delta\theta_{пов} = K \frac{P'_{э,п1} + \sum P_{ст}}{\pi D_1 l_{\delta} \alpha_1} = 0,2 \frac{450 + 234}{3,14 \cdot 0,185 \cdot 0,18 \cdot 105} = 12 ,$$

где α_1 = 105 – коэффициент теплоотдачи с поверхности (рис. 11.2);

K = 0,2 – коэффициент, учитывающий передачу части потерь сердечника статора через станину непосредственно в окружающую среду (табл. 11.2).

11.3. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по формуле (11.3), °С:

$$\Delta\theta_{\text{из,п1}} = \frac{P'_{\text{э,п1}}}{Z_1 \Pi_{\text{п1}} t_1}\left(\frac{b_{\text{из1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda'_{\text{экв}}}\right) =$$

$$= \frac{450}{48 \cdot 0{,}056 \cdot 0{,}0121}\left(\frac{0{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}16} + \frac{(9{,}3 + 7) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1{,}4}\right) = 44,$$

где $\Pi_{\text{п1}}$ – периметр поперечного сечения паза статора по формуле (11.4), м (см. рис. 3.1, *а*):

$$\Pi_{\text{п1}} = 2h_{\text{п1}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} + (9{,}3 + 7) \cdot 10^{-3} = 0{,}056;$$

$b_{\text{из1}}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу для всыпной обмотки, м:

$$b_{\text{из1}} = (0{,}3...0{,}9) \cdot 10^{-3};$$

$\lambda_{\text{экв}} = 0{,}16$ Вт/(м·°С) – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции;

$\lambda'_{\text{экв}}$ = 1,4 – среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции всыпной обмотки по рис. 11.3.

11.4. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по формуле (11.6), °С:

$$\Delta\theta_{\text{из,л1}} = \frac{P'_{\text{э,л1}}}{2Z_1 \Pi_{\text{л1}} l_{\text{л1}}}\left(\frac{b_{\text{из,л1}}}{\lambda'_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{п1}}}{12\lambda'_{\text{экв}}}\right) =$$

$$= \frac{611}{2 \cdot 48 \cdot 0{,}056 \cdot 0{,}245}\left(\frac{0{,}4 \cdot 10^{-3}}{0{,}16} + \frac{20 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1{,}4}\right) = 1{,}7,$$

где $\Pi_{\text{л1}} \approx \Pi_{\text{п1}}$ – периметр поверхности охлаждения лобовой части одной катушки;

$b_{из,л1} = 0,4 \cdot 10^{-3}$ м – односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки.

11.5. Превышение температуры наружной поверхности изоляции лобовых частей обмотки над температурой воздуха внутри машины по формуле (11,7), °С:

$$\Delta\theta_{пов.л1} = \frac{K P'_{э,л1}}{2\pi D_1 l_{в1} \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 611}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,185 \cdot 0,077 \cdot 105} = 13 .$$

11.6. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины по формуле (11.8), °С:

$$\Delta\theta'_1 = \frac{\left(\Delta\theta_{пов} + \Delta\theta_{из,п1}\right) 2 l_\delta + \left(\Delta\theta_{из,л1} + \Delta\theta_{пов.л1}\right) 2 l_{л1}}{l_{ср.1}} =$$

$$= \frac{(12 + 44) \cdot 2 \cdot 0,18 + (1,7 + 13) \cdot 2 \cdot 0,245}{0,85} = 32 .$$

11.7. Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды по формуле (11.9), °С:

$$\Delta\theta_в = \frac{\sum P'_в}{S_{кор} \alpha_в} = \frac{1460}{1,14 \cdot 21} = 61 ,$$

где $\sum P'_в$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя, за исключением доли потерь в статоре, передаваемой через наружную поверхность сердечника по формуле (11.10), Вт:

$$\sum P'_в = \sum P - \left[(1 - K)\left(P'_{э,п1} + \sum P_c\right)\right] =$$

$$= 2083 - \left[(1 - 0,2)(450 + 329)\right] = 1460 ;$$

$\alpha_в$ = 21 – коэффициент подогрева воздуха, Вт/(м$^2 \cdot$°С), учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины (рис. 11.2);

$S_{кор}$ – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса по формуле (11.11), м^2:

$$S_{кор} = \left(\pi D_a + 8\Pi_р\right)\left(l_\delta + 2l_{в.1}\right) =$$

$$= (3{,}14 \cdot 0{,}27 + 8 \cdot 0{,}32)(0{,}18 + 2 \cdot 0{,}077) = 1{,}14 ,$$

где $\Pi_р$ = 0,32 – условный периметр поперечного сечения ребер станины (рис. 11.4).

11.8. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по формуле (11.12), °С:

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta_1' + \Delta\theta_в = 32 + 61 = 93 .$$

Приложение 1

Таблица П-1

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2	Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм^2
0,08	0,10	0,00502	(0,53)	0,585	0,221
0,09	0,11	0,00636	0,56	0,615	0,246
0,10	0,122	0,00785	0,60	0,655	0,283
0,112	0,134	0,00985	0,63	0,69	0,312
0,125	0,147	0,01227	(0,67)	0,73	0,353
(0,132)	0,154	0,01368	0,71	0,77	0,396
0,14	0,162	0,01539	0,75	0,815	0,442
0,15	0,18	0,01767	0,80	0,865	0,503
0,16	0,19	0,0201	0,85	0,915	0,567
0,17	0,20	0,0227	0,90	0,965	0,636
0,18	0,21	0,0255	0,95	1,015	0,709
(0,19)	0,22	0,0284	1,00	1,08	0,785
0,20	0,23	0,0314	1,06	1,14	0,883
(0,212)	0,242	0,0353	1,12	1,20	0,985
0,224	0,259	0,0394	1,18	1,26	1,094
(0,236)	0,271	0,0437	1,25	1,33	1,227
0,25	0,285	0,0491	1,32	1,405	1,368
(0,265)	0,300	0,0552	1,40	1,485	1,539
0,28	0,315	0,0616	1,50	1,585	1,767
(0,30)	0,335	0,0707	1,60	1,685	2,011
0,315	0,35	0,0779	1,70	1,785	2,27
0,335	0,37	0,0881	1,80	1,895	2,54
0,355	0,395	0,099	1,90	1,995	2,83
0,375	0,415	0,1104	2,00	2,095	3,14
0,40	0,44	0,1257	2,12	2,22	3,53
0,425	0,465	0,1419	2,24	2,34	3,94
0,45	0,49	0,1590	2,36	2,46	4,36
(0,475)	0,515	0,1772	2,5	2,60	4,91
0,50	0,545	0,1963			

Примечание: 1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Т а б л и ц а П-2

Размеры и площади поперечного сечения прямоугольной проволоки

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																	
2,00	1,463	1,545	1,626	1,706	1,785	1,905	2,025	2,145	2,285	2,425	2,585	–	–	–	–	–	–	–
2,12	1,559	–	1,734	–	1,905	–	2,160	–	2,435	–	2,753	–	–	–	–	–	–	–
2,24	1,655	1,749	1,842	1,934	2,025	2,160	2,294	2,429	2,585	2,742	2,921	3,145	3,369	–	–	–	–	–
2,36	1,751	–	1,950	–	2,145	–	2,429	–	2,735	–	3,089	–	3,561	–	–	–	–	–
2,50	1,863	1,970	2,076	2,181	2,285	2,435	2,585	2,736	2,910	3,085	3,285	3,535	3,785	3,887	4,137	–	–	
2,65	1,983	–	2,211	–	2,435	–	2,753	–	3,098	–	3,495	–	4,025	–	4,407	–	–	
2,80	2,103	2,225	2,346	2,466	2,585	2,753	2,921	3,089	3,285	3,481	3,705	3,985	4,265	4,397	4,677	4,957	5,237	–
3,00	2,263	–	2,526	–	2,785	–	3,145	–	3,535	–	3,985	–	4,585	–	5,038	–	5,638	–
3,15	2,383	2,522	2,661	2,799	2,935	3,124	3,313	3,502	3,723	3,943	4,195	4,510	4,825	4,992	5,307	5,622	5,937	6,315
3,35	2,543	–	2,841	–	3,135	–	3,537	–	3,973	–	4,475	–	5,145	–	5,667	–	6,337	–
3,55	2,703	2,862	3,021	3,179	3,335	3,548	3,761	3,974	4,223	4,471	4,755	5,110	5,465	5,672	6,027	6,382	6,737	7,163
3,75	2,863	–	3,201	–	3,535	–	3,985	–	4,473	–	5,035	–	5,785	–	6,387	–	7,137	–
4,00	3,063	3,245	3,426	3,606	3,785	4,025	4,265	4,505	4,785	5,065	5,385	5,785	6,185	6,437	6,837	7,237	7,637	8,117
4,25	3,263	–	3,651	–	4,035	–	4,545	–	5,098	–	5,735	–	6,585	–	7,287	–	8,137	–
4,50	3,463	3,670	3,876	4,081	4,285	4,555	4,825	5,095	5,410	5,725	6,085	6,535	6,985	7,287	7,737	8,187	8,637	9,177

Продолжение табл. П-2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																	
	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00	1,06	1,12	1,18	1,25	1,32	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12
	Расчетное сечение проволоки, мм²																	
4,75	3,663	–	4,101	–	4,535	–	5,105	–	5,723	–	6,435	–	7,385	–	8,188	–	9,137	–
5,00	3,863	4,095	4,326	4,556	4,785	5,085	5,385	5,685	6,035	6,385	6,785	7,285	7,785	8,137	8,637	9,137	9,637	10,24
5,30	4,103	–	4,596	–	5,085	–	5,721	–	6,410	–	7,205	–	8,265	–	9,177	–	10,24	–
5,60	4,343	4,605	4,866	5,126	5,385	5,721	6,057	6,393	6,785	7,177	7,625	8,185	8,745	9,157	9,717	10,28	10,84	11,51
6,00	4,663	–	5,226	–	5,785	–	6,505	–	7,285	–	8,185	–	9,385	–	10,44	–	11,64	–
6,30	4,903	5,200	5,496	5,791	6,085	6,463	6,841	7,219	7,660	8,101	8,605	9,235	9,865	10,35	10,98	11,61	12,24	12,99
6,70	–	–	5,856	–	6,485	–	7,289	–	8,160	–	9,165	–	10,51	–	11,70	–	13,04	–
7,10			6,216	6,551	6,885	7,311	7,737	8,163	8,660	9,157	9,725	10,44	11,15	11,71	12,42	13,13	13,84	14,69
7,50	–	–	–	–	7,285	–	8,185	–	9,160	–	10,29	–	11,79	–	13,14	–	14,64	–
8,00	–	–	–	–	7,785	8,265	8,745	9,225	9,785	10,35	10,99	11,79	12,59	13,24	14,04	14,84	15,64	16,60
8,50	–	–	–	–	–	–	9,305	–	10,41	–	11,69	–	13,39	–	14,94	–	16,64	–
9,00	–	–	–	–	–	–	9,865	10,41	11,04	11,67	12,39	13,29	14,19	14,94	15,84	16,74	17,64	18,72
9,5	–	–	–	–	–	–	–	–	11,66	–	13,09	–	14,99	–	16,74	–	18,64	–
10,0	–	–	–	–	–	–	–	–	12,29	12,99	13,79	14,79	15,79	16,64	17,64	18,64	19,64	20,84
10,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	14,63	–	16,75	–	18,72	–	20,84	–
11,2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	15,47	16,59	17,71	18,68	19,8	20,92	22,04	23,38
11,8	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	18,67	–	20,88	–	23,24	–
12,5	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	19,79	20,89	22,14	23,39	24,64	26,14

Окончание табл. П-2

Номинальный размер проволоки по большей стороне b, мм	Номинальный размер проволоки по меньшей стороне a, мм																
	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Расчетное сечение проволоки, мм^2																
3,75	8,037	–	8,826	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,00	8,597	8,891	9,451	10,65	10,85	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,25	9,157	–	10,08	–	11,35	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,50	9,717	10,07	10,70	11,38	12,05	12,95	13,63	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,75	10,28	–	11,33	–	12,75	–	14,41	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5,00	10,84	11,25	11,95	12,70	13,45	14,45	15,20	16,20	17,20	–	–	–	–	–	–	–	–
5,30	11,51	–	12,70	–	14,29	–	16,15	–	18,27	–	–	–	–	–	–	–	–
5,60	12,18	12,67	13,45	14,29	15,13	16,25	17,09	18,21	19,33	20,14	21,54	–	–	–	–	–	–
6,00	13,08	–	14,45	–	16,25	–	18,35	–	20,75	–	23,14	–	–	–	–	–	–
6,30	13,75	14,32	15,20	16,15	17,09	18,35	19,30	20,56	21,82	22,77	24,34	25,92	27,49	–	–	–	–
6,70	14,65	–	16,20	–	18,21	–	20,56	–	23,24	–	25,94	–	29,29	–	–	–	–
7,10	15,54	16,21	17,20	18,27	19,33	20,75	21,82	23,24	24,66	25,77	27,54	29,32	31,09	32,87	34,64	–	–
7,50	16,44	–	18,20	–	20,45	–	23,08	–	26,08	–	29,14	–	32,89	–	36,64	–	–
8,00	17,56	18,33	19,45	20,65	21,85	23,45	24,65	26,25	27,85	29,14	31,14	33,14	35,14	37,14	39,24	41,54	43,94
8,50	18,68	–	20,70	–	23,25	–	26,23	–	29,63	–	33,14	–	37,39	–	41,64	–	46,74
9,00	19,80	20,69	21,95	23,30	24,65	26,54	27,80	29,60	31,40	32,89	35,14	37,39	39,64	41,89	44,14	46,84	49,54
9,50	20,92	–	23,20	–	26,05	–	29,38	–	33,18	–	37,14	–	41,89	–	46,64	–	52,34
10,0	22,04	23,05	28,45	25,95	27,45	29,45	30,95	32,95	34,95	36,64	39,14	41,64	44,14	46,64	49,14	52,14	55,14
10,8	23,38	–	25,95	–	29,13	–	32,84	–	37,08	–	41,54	–	46,84	–	52,14	–	58,50
11,2	24,73	25,88	27,45	29,13	30,81	33,05	34,73	36,97	39,21	41,14	43,94	46,74	49,54	52,34	55,14	58,50	61,86
11,8	26,07	–	28,95	–	32,49	–	36,62	–	41,34	–	46,34	–	52,24	–	52,14	–	65,22
12,5	27,64	24,95	30,70	32,58	34,45	36,95	38,83	41,33	43,83	46,02	49,14	52,27	55,39	58,52	61,64	65,39	69,14

Примечание. Проволока с размерами, расположенными в пределах, ограниченных сверху и снизу жирной линией (▬▬), может изготовляться в виде обмоточного провода марок ПЭТВП и ПЭТП-155 с нагревостойкой высокопрочной эмалевой изоляцией; в пределах, ограниченных тонкой линией (———), – марок ПСД и ПСДК с изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой нагревостойким или кремнийорганическим лаком; в пределах, ограниченных штрихпунктирной линией (-·-·-), – марки ПСДКТ с уточненной изоляцией из бесщелочного стекловолокна с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком.

Таблица П-3

Кривая намагничивания стали 2013

B, Тл	**0**	**0,01**	**0,02**	**0,03**	**0,04**	**0,05**	**0,06**	**0,07**	**0,08**	**0,09**
	$H \cdot 10^2$, А/м									
0,4	0,56	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6	0,60	0,61	0,61	0,62
0,5	0,63	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69
0,6	0,7	0,7	0,71	0,72	0,73	0,74	0,74	0,75	0,76	0,77
0,7	0,76	0,79	0,8	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
0,8	0,88	0,89	0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97
0,9	0,99	1,0	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	1,07	1,08
1,0	1,1	1,11	1,13	1,14	1,15	1,17	1,18	1,2	1,21	1,23
1,1	1,25	1,26	1,27	1,28	1,29	1,32	1,33	1,34	1,36	1,38
1,2	1,41	1,46	1,52	1,58	1,64	1,7	1,76	1,82	1,88	1,94
1,3	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
1,4	3,0	3,2	3,5	3,8	4,1	4,3	4,6	5,0	5,4	5,8
1,5	6,2	6,7	7,8	8,9	10,0	11,3	12,4	13,5	14,6	15,8
1,6	17,0	18,6	20,2	21,8	23,4	25,0	27,0	28,0	30,0	32,0
1,7	34,0	37,0	40,0	43,0	47,0	50,0	54,0	58,0	62,0	66,0
1,8	70,0	75,0	80,0	85,0	92,0	100	106	112	118	124
1,9	130	135	142	148	156	165	173	181	189	198
2,0	207	226	244	263	281	300	360	420	480	540
2,1	600	670	740	810	830	950	1020	1090	1160	1230
2,2	1300	1380	1460	1540	1620	1700	1780	1860	1940	2020
2,3	2100	2180	2260	2340	2420	2500	2580	2660	2740	2820
2,4	2900	2980	3060	3140	3220	3300	3380	3460	3540	3620

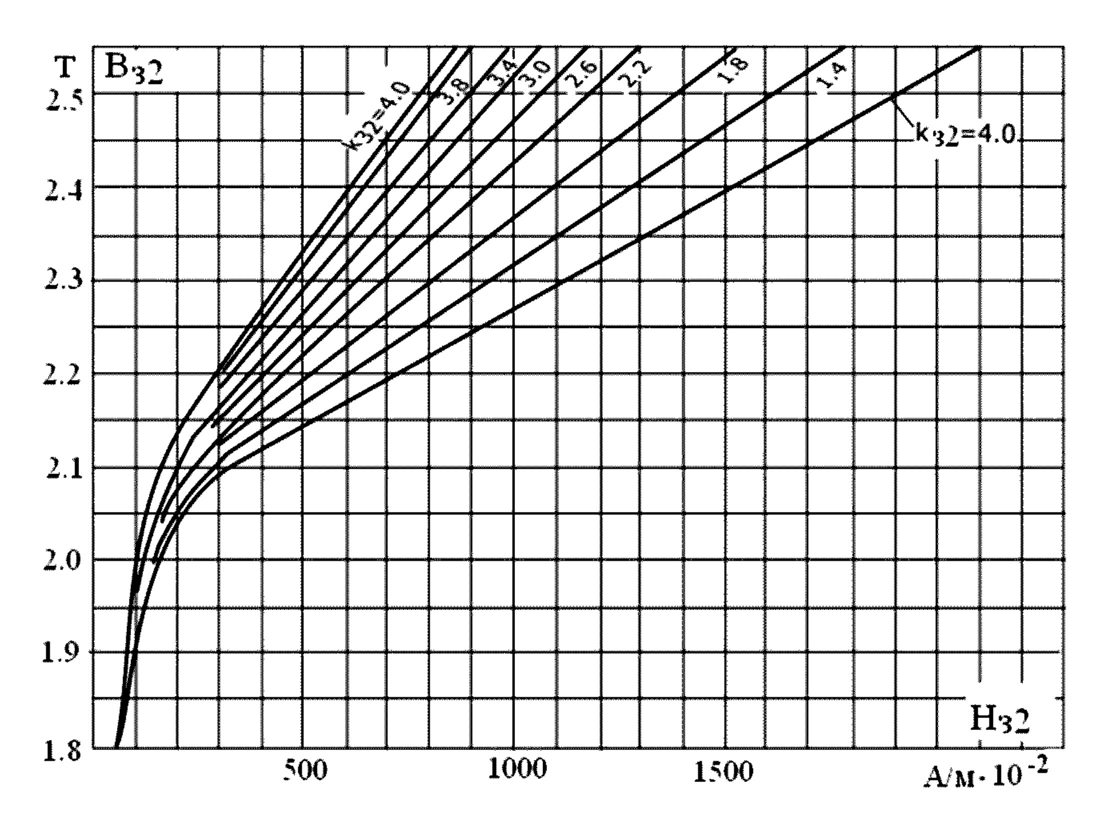


Рис. П-4. Кривые намагничивания для зубцов

Приложение 2

Программа расчета рабочих характеристик в системе MathCAD.

Рабочие характеристики

***Исходные данные*:**

$P_2 := 18500$ $\Sigma P_{мх} := 117$ $\Sigma P_c := 329.8$ $\eta_{zad} := 0.89$ $m_1 := 3$ $U_1 := 220$

$Z_k := 1.21$ $x_k := 1.12$ $r_k := 0.46$ $r''_2 := 0.19$ $x_m := 17.9$ $r_1 := 0.27$

$\tau_1 := 0.029$ $\rho_1 := 0.015$ $I_{c.a} := 0.674$ $I_{c.p} := 11.9$

Номинальная точка

$k := 1$

$$P_Д := 0.005\cdot\left(\frac{k\cdot P_2}{\eta_{zad}}\right)$$

$$P'_2 := k\cdot P_2 + \Sigma P_{мх} + P_Д$$

$$R_н := \frac{m_1\cdot U_1^2}{2\cdot P'_2} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m_1\cdot U_1^2}{2\cdot P'_2} - r_k\right)^2 - Z_k^2}$$

$$Z_н := \sqrt{(R_н + r_k)^2 + x_k^2}$$

$$S_н := \frac{1}{1 + \frac{R_н}{r''_2}}$$

$$I''_2 := \frac{U_1}{Z_н}$$

$$I_{a1} := I_{c.a} + I''_2\cdot\left(\frac{R_н + r_k}{Z_н}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} + \frac{x_k}{Z_н}\cdot\frac{2\cdot\rho_1}{1+\rho_1^2}\right)$$

$$I_{p1} := I_{c.p} + I''_2\cdot\left(\frac{x_k}{Z_н}\cdot\frac{1-\rho_1^2}{1+\rho_1^2} - \frac{R_н + r_k}{Z_н}\cdot\frac{2\cdot\rho_1}{1+\rho_1^2}\right)$$

$$I_1 := \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} \qquad \cos\varphi := \frac{I_{a1}}{I_1}$$

$$P_{м1} := m_1\cdot I_1^2\cdot r_1 \qquad P_{м2} := m_1\cdot I''^2_2\cdot r''_2$$

$$\Sigma P := P_{м1} + P_{м2} + \Sigma P_c + \Sigma P_{мх} + P_Д \qquad P_1 := k\cdot P_2 + \Sigma P$$

$$\eta := \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1}\right)\cdot 100$$

***Проверка*:**

$$P_{1pr} := m_1\cdot I_{a1}\cdot U_1$$

$$P_{2pr} := m_1\cdot I_1\cdot U_1\cdot\eta\cdot\cos\varphi$$

Расчет рабочих характеристик:

$$
\begin{aligned}
\text{Раб_хар} :=\ & k \leftarrow 0.25 \\
& i \leftarrow 0 \\
& \text{while } k \le 1.25 \\
& \quad P_Д \leftarrow 0.005 \cdot \left(\frac{k \cdot P_2}{\eta_{zad}} \right) \\
& \quad P'_2 \leftarrow k \cdot P_2 + \Sigma P_{мх} + P_Д \\
& \quad R \leftarrow \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k + \sqrt{\left(\frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot P'_2} - r_k \right)^2 - Z_k^2} \\
& \quad Z \leftarrow \sqrt{(R + r_k)^2 + x_k^2} \\
& \quad S \leftarrow \frac{1}{1 + \frac{R}{r''_2}} \\
& \quad M_{i,0} \leftarrow S \\
& \quad I''_2 \leftarrow \frac{U_1}{Z} \\
& \quad I_{a1} \leftarrow I_{c.a} + I''_2 \cdot \left(\frac{R + r_k}{Z} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_k}{Z} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) \\
& \quad I_{p1} \leftarrow I_{c.p} + I''_2 \cdot \left(\frac{x_k}{Z} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R + r_k}{Z} \cdot \frac{2 \cdot \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) \\
& \quad I_1 \leftarrow \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} \\
& \quad M_{i,1} \leftarrow I_1 \\
& \quad \cos\varphi \leftarrow \frac{I_{a1}}{I_1} \\
& \quad M_{i,2} \leftarrow \cos\varphi \\
& \quad P_{M1} \leftarrow m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \\
& \quad P_{M2} \leftarrow m_1 \cdot I''^2_2 \cdot r''_2 \\
& \quad \Sigma P \leftarrow P_{M1} + P_{M2} + \Sigma P_c + \Sigma P_{мх} + P_Д \\
& \quad P_1 \leftarrow k \cdot P_2 + \Sigma P \\
& \quad \eta \leftarrow \left(1 - \frac{\Sigma P}{P_1} \right) \cdot 100 \\
& \quad M_{i,3} \leftarrow \eta \\
& \quad k \leftarrow k + 0.25 \\
& \quad i \leftarrow i + 1 \\
& M
\end{aligned}
$$

$$
\text{Раб_хар} = \begin{pmatrix} 0.006 & 14.393 & 0.557 & 87.325 \\ 0.013 & 19.899 & 0.775 & 90.741 \\ 0.02 & 26.931 & 0.858 & 90.826 \\ 0.028 & 34.916 & 0.892 & 89.911 \\ 0.037 & 43.746 & 0.904 & 88.466 \end{pmatrix}
$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др. – Москва : Энергия, 2011.

2. *Гурин Я. С.* Проектирование серии электрических машин / Я. С. Гурин, Б. Н. Кузнецов. – Москва : Энергия, 1978.

3. *Кравчик А. Э.* Асинхронные двигатели серии 4А / А. Э. Кравчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 504 с.

4. *Алексеев А. Е.* Конструкции электрических машин / А. Е. Алексеев. – Ленинград : Энергия, 1972.

5. Машины электрические вращающиеся. ГОСТ 31606-2012.

6. *Гольдберг О. Д.* Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, И. С. Свириденко. – Москва : Высшая школа, 2006. – 431 с.

7. *Гольдберг О. Д.* Проектирование электрических машин / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И. С. Свириденко. – Москва : Высшая школа, 1984. – 431 с.

8. *Копылов И. П.* Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / И. П. Копылов ; ответственный редактор И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Юрайт, 2017. – 767 с. – (Бакалавр. Академический курс). – ISBN 978-5-9916-1848-9. – Текст : электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. – URL: https://urait.ru/bcode/406335 (дата обращения: 16.01.2020).

Шевченко Александр Федорович
Шевченко Людмила Григорьевна

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Учебное пособие

Редактор *Е.Е. Татарникова*
Выпускающий редактор *И.П. Брованова*
Дизайн обложки *А.В. Ладыжская*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 3000 ОК 005-93 (ОКП)

Подписано в печать 07.02.2020. Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Тираж 50 экз.
Уч.-изд. л. 7,20. Печ. л. 7,75. Изд. № 247/19. Заказ № 354. Цена договорная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20